



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y cálculo de la columna de dirección para una motocicleta con suspensión delantera alternativa

Autor: Óscar de la Fuente Castroverde

Tutores: Higinio Rubio Alonso
Carlos Beltrán Carrión

Leganés, septiembre de 2012



Título: Diseño y cálculo de la columna de dirección para una motocicleta con suspensión delantera alternativa.

Autor: Óscar de la Fuente Castroverde.

Director: Higinio Rubio Alonso.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día ____ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





*A mis padres,
sin su apoyo no habría sido posible.*



Agradecimientos

Desde estas líneas, quiero agradecer a Higinio Rubio Alonso toda la ayuda prestada durante la realización del presente trabajo de fin de grado. Sin su ayuda, éste nunca habría llegado a buen puerto.

A Carlos Beltrán, José María Burgaleta y al resto del equipo de “LaMoto2” les agradezco, de todo corazón, la oportunidad brindada y la confianza y el apoyo mostrados durante todo el desarrollo del proyecto.

A mis compañeros en el proyecto MotoStudent quiero agradecerles su esfuerzo para sacar adelante el proyecto. Y, por supuesto, todos los buenos momentos en grupo que me han dado.

Resumen

En el presente proyecto se analiza y comenta el diseño de una columna de dirección adaptada a una motocicleta de competición con suspensión alternativa.

Para ello se comienza haciendo un análisis de la física de las motocicletas y la evolución de las suspensiones delanteras con la intención de establecer unos requisitos y unos objetivos de diseño.

Partiendo de un concepto básico planteado con anterioridad al inicio del proyecto, y siguiendo una metodología de diseño definida, se evoluciona dicho concepto hasta lograr un diseño final con el que se cumplan todos los objetivos propuestos.

Finalmente, se realizan una serie de cálculos dinámicos y estructurales mediante los que se valida el diseño.

Como cierre del proyecto, se presentan una serie de posibles vías de desarrollo futuras que deberán ser tenidas en cuenta para cualquier actualización del diseño posterior.

Palabras clave: Motocicleta, columna de dirección, suspensión alternativa, LaMoto2, MotoStudent.

Abstract

In this project, it has been analysed and discussed an alternative suspension motorcycle steering column design process.

In order to accomplish this, it has been necessary to make a motorcycle physics studio. It has also been done an historical review of all alternative suspension in motorcycle history. With these analyses it has been possible to establish design criteria and targets.

Starting from a basis concept previously set out, the steering column has been developed according to design criteria in order to achieve the proposed aims.

Finally, it has been done a set of structural and dynamics calculations justifying the chosen design.

As project closure, it has been suggested a series of possible development paths that should be taken into consideration in any future design update.

Keyword: Motorbike, steering column, alternative suspension, LaMoto2, MotoStudent.

ÍNDICE

1.	Introducción al proyecto	19
2.	Física de la motocicleta	25
2.1.	Definiciones básicas	25
2.2.	Física de la motocicleta	26
2.2.1	Esquema longitudinal	28
2.2.2	Consideraciones geométricas de la motocicleta	30
2.2.3	Las ruedas	38
2.2.4	Masa suspendida, masa no suspendida y centro de gravedad	38
2.2.5	Esfuerzos sobre la suspensión	41
2.2.6	Consideraciones de rigidez del chasis	46
3.	Reseña histórica y estado del arte	47
3.1.	Eje de dirección en el chasis (pipa de dirección)	48
3.2.	Las iniciativas de BMW	51
3.3.	Hub-centre steering	53
3.4.	Proyecto ELF	57
3.5.	Demonstener D1200R	59
4.	La suspensión delantera	61
4.1.	Problemas de las suspensiones tradicionales	61
4.2.	Antecedentes y planteamiento de la suspensión delantera de LaMoto2	67
5.	Metodología de diseño	76
5.1.	Diseño de partida	76
5.2.	Restricciones de diseño	78
5.2.1.	Normativa de la competición (CEV Buckler)	78
5.3.	Criterios de diseño	80
6.	Ensayos previos	85
6.1.	Telemetría	85
6.2.	Pruebas de extensometría	90
7.	Diseño de la dirección	96
7.1.	Explicación en detalle del sistema mecánico de la dirección	96
7.2.	Geometría de la suspensión	104
7.3.	Buje (MT2-DI-04-00)	104
7.4.	Conjunto horquilla de dirección (MT2-DI-03-00)	107

7.5.	Pletina de dirección (MT2-DI-02-01).....	117
7.6.	Conjunto barras telescópicas (MT2-DI-00-00).	118
7.7.	Pipa de dirección (MT2-DI-01-00).	132
8.	Cálculos justificativos	135
8.1.	Simulaciones dinámicas	135
8.2.	Análisis de resistencia mecánica (MEF).....	141
8.2.1.	Tija Superior y casquillos (MT2-DI-00-01 y MT2-DI-00-03)	141
8.2.2.	Pipa de dirección (MT2-DI-01-00)	149
8.2.3.	Conjunto botellas telescópicas (MT2-DI-00-00).....	155
8.2.4.	Horquilla de dirección (MT2-DI-03-01)	164
8.2.5.	Buje (MT2-DI-04-00).....	179
9.	Presupuesto.....	188
10.	Conclusiones y trabajos futuros.....	191
10.1.	Conclusiones.....	191
10.2.	Trabajos futuros	192
	Bibliografía	194
	Anexo 1: Planos del sistema.....	195
	Anexo 2: Reglamento CEV Buckler	213

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Estado de desarrollo actual del diseño de la motocicleta del proyecto LaMoto2.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 1.2: Interfaz gráfica del programa CATIA V5</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1.3: Interfaz gráfica del programa Working Model</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1.4: Interfaz gráfica del software de análisis de los datos obtenidos mediante telemetría ...</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1.5: Ejemplo de galga extensométrica</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.1: sistema de referencia usado en las motocicletas.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.2: Péndulo invertido</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.3: Esquema lateral de sólido rígido de una motocicleta.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.4: Principales parámetros de la geometría de una motocicleta</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.5: Esquema general de la Python-Lowracer.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.6: Modelo real de la Python-Lowracer</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.7: Variación del descentramiento de la horquilla en función de la variación del avance. ...</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.8: Desplazamiento vertical del centro de la rueda debido al giro de la dirección.</i>	
<i>Comparación entre un lanzamiento nulo y un lanzamiento de 90°</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.9: Discrepancia entre ángulo de manillar y ángulo de giro de la rueda.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.10: Variación del radio de giro de una motocicleta según la distancia entre ejes.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.11: Variación de las geometrías de la dirección debidas al hundimiento de la suspensión delantera.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.12: Motocicletas de competición apoyadas únicamente en su rueda trasera debido a la transferencia de peso durante la fase de aceleración.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.13: Motocicleta de competición apoyada únicamente en su rueda delantera debido a la transferencia de peso durante la fase de frenada.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.14: Esquema de fuerzas en la suspensión delantera al circular sobre una irregularidad. ...</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.15: Frenada en una motocicleta de competición.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.16: Esquema de fuerzas en la rueda delantera durante una frenada en una motocicleta. .</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.17: Componentes de la fuerza que un bache provoca sobre una motocicleta inclinada.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.18: Posibles trayectorias de la suspensión frente a la absorción de un bache.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.19: Absorción de un bache idealizando la moto como un sólido rígido.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.1: Motocicleta Reitwagen</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.2: Motocicleta Hildebrand & Wolfmüller</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.3: Esquema de suspensión Girder</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.4: Esquema del primer sistema de suspensión por horquillas diseñado por BMW.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.5: Esquema del funcionamiento del sistema de suspensión por rueda empujada.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.6: Moto Guzzi V8 equipada con suspensión por rueda empujada.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.7: Horquilla invertida moderna.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.8: Comparación del sistema interno de dos amortiguadores. A la izquierda el sistema tradicional, a la derecha el sistema "Big Piston Fork".....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.9: Sistema Telelever de BMW.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.10: Esquema del sistema de suspensión Hossack usado en la MotoStudent MS1 diseñada en la UC3M.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.11: Sistema Doulever de BMW.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.12: Motocicleta Ner-a-Car de 1918.....</i>	<i>54</i>

<i>Figura 3.13: Detalle del buje delantero de la Ner-a-Car</i>	54
<i>Figura 3.14: Montaje del eje de dirección de un buje tipo Difazio</i>	55
<i>Figura 3.15: Eje de dirección usado en un sistema con buje tipo Difazio</i>	55
<i>Figura 3.16: Pivotamiento del eje de dirección en un buje tipo Difazio</i>	55
<i>Figura 3.17: Suzuki 500 equipada con el sistema original diseñado por Jack Difazio</i>	56
<i>Figura 3.18: Bimota Tesi 3D</i>	56
<i>Figura 3.19: Detalle del sistema de suspensión/dirección de la Bimota TESI.....</i>	57
<i>Figura 3.20: Prototipo original de la Elf-X</i>	58
<i>Figura 3.21: Elf-E</i>	58
<i>Figura 3.22: Detalle de la suspensión delantera de la Elf-E</i>	58
<i>Figura 3.23: Elf-3</i>	59
<i>Figura 3.24: Demonstener D1200R</i>	59
<i>Figura 3.25: Esquema del sistema de suspensión y dirección delantera de la Demonstener D1200R60</i>	
<i>Figura 4.1: Suspensión delantera con horquillas invertidas.</i>	62
<i>Figura 4.2: Chasis Ducati 1198 Panigale. En la imagen se aprecia la masiva pipa de dirección diseñada para soportar todos los esfuerzos transmitidos desde la suspensión.....</i>	63
<i>Figura 4.3: Vyrus 984. En la imagen se puede observar la ligereza del chasis en la zona de la pipa de dirección.</i>	63
<i>Figura 4.4: Detalle de una horquilla convencional con las dos botellas unidas mediante un arco. ...</i>	64
<i>Figura 4.5: Detalle de una horquilla invertida con un eje de gran diámetro rigidizando el conjunto.....</i>	64
<i>Figura 4.6: Entrada al airbox de una motocicleta de competición con horquilla convencional.....</i>	65
<i>Figura 4.7: Entrada al airbox vista desde la zona trasera de la motocicleta.</i>	66
<i>Figura 4.8: Esquema de un chasis equipado con una pipa "stemless".....</i>	66
<i>Figura 4.9: Primer esquema de la suspensión delantera de LaMoto2. 1) Horquilla de suspensión. 2) Basculantes superpuestos. 3) Buje.</i>	68
<i>Figura 4.10: Esquema lateral del primer diseño de la suspensión delantera de LaMoto2.</i>	69
<i>Figura 4.11: Amortiguador Öhlins TTX 36</i>	70
<i>Figura 4.12: Vistas del modelo CAD del amortiguador TTX36 proporcionado por Öhlins.</i>	70
<i>Figura 4.13: Curvas de amortiguación proporcionadas por Öhlins. Fuerza de amortiguación frente a velocidad.</i>	71
<i>Figura 4.14: Primer loop de desarrollo del sistema de suspensión delantero de LaMoto2.</i>	71
<i>Figura 4.15: Vista en perspectiva del diseño final de la suspensión delantera de LaMoto2.....</i>	72
<i>Figura 4.16: Vista lateral del diseño final de la suspensión delantera de LaMoto2.....</i>	72
<i>Figura 4.17: Vista frontal del diseño final del sistema de suspensión de LaMoto2.</i>	73
<i>Figura 4.18: Fuerzas aplicadas sobre la suspensión delantera de LaMoto2 durante la frenada.</i>	74
<i>Figura 4.19: Representación esquemática del sistema de suspensión delantera de LaMoto2 y las fuerzas aplicadas sobre éste durante la frenada.</i>	74
<i>Figura 5.1: Planteamiento inicial del sistema de dirección de LaMoto2.....</i>	77
<i>Figura 5.2: Resultado del primer loop de diseño del sistema de dirección de LaMoto2.</i>	78
<i>Figura 5.3: Algoritmo del proceso de diseño de cada una de las piezas de LaMoto2.....</i>	82
<i>Figura 6.1: Circuito de Albacete</i>	85
<i>Figura 6.2: Velocidad de la motocicleta en cada tramo del circuito</i>	86
<i>Figura 6.3: Perfil de velocidades de la motocicleta a lo largo del circuito.</i>	86
<i>Figura 6.4: Recorrido de la suspensión delantera en cada tramo del circuito.</i>	87

<i>Figura 6.5: Perfil del recorrido de la suspensión delantera a lo largo del circuito.</i>	87
<i>Figura 6.6: Aceleración longitudinal sufrida por la motocicleta en cada tramo del circuito.</i>	88
<i>Figura 6.7: Perfil de aceleraciones sufridas por la motocicleta a lo largo del circuito.</i>	88
<i>Figura 6.8: Superposición de los perfiles de aceleraciones sufridas y recorrido de la suspensión delantera a lo largo del circuito.</i>	89
<i>Figura 6.9: Recorrido de la suspensión delantera (eje y) frente a aceleraciones longitudinales sufridas (eje x).</i>	89
<i>Figura 6.10: Inclinación lateral de la motocicleta en cada tramo del circuito.</i>	90
<i>Figura 6.11: Perfil del ángulo inclinado por la motocicleta a lo largo del circuito.</i>	90
<i>Figura 6.12: Detalle del soporte del equipo de extensometría en la motocicleta.</i>	91
<i>Figura 6.13: Instalación sobre la motocicleta del equipo de extensometría y telemetría.</i>	92
<i>Figura 6.14: Lanzamiento de las mediciones antes del comienzo de la prueba.</i>	92
<i>Figura 6.15: Esquema de la colocación de las galgas sobre el semimanillar.</i>	93
<i>Figura 6.16: Detalle de una de las galgas extensométricas.</i>	93
<i>Figura 6.17: Deformación de una de las galgas extensométricas a lo largo del tiempo.</i>	94
<i>Figura 6.18: Gráficas obtenidas de la telemetría utilizada durante la realización de la prueba</i>	94
<i>Figura 6.19: Ejemplo del análisis de elementos finitos realizado sobre el modelo del semimanillar.</i>	95
<i>Figura 7.1: Render del diseño final del sistema de dirección de LaMoto2.</i>	96
<i>Figura 7.2: Eje de dirección.</i>	97
<i>Figura 7.3: Conjunto eje-buje.</i>	97
<i>Figura 7.4: Esquema del funcionamiento de la suspensión.</i>	98
<i>Figura 7.5: Detalle de la pieza usada para transmitir los esfuerzos de dirección.</i>	99
<i>Figura 7.6: Detalle del giro del sistema de dirección.</i>	99
<i>Figura 7.7: Conjunto de botellas telescópicas.</i>	100
<i>Figura 7.8: Corte del alojamiento de las rótulas usadas en el conjunto MT2-DI-00-00.</i>	101
<i>Figura 7.9: Entrada al air-box.</i>	102
<i>Figura 7.10: Conjunto de la pipa de dirección.</i>	103
<i>Figura 7.11: sistema de dirección instalado sobre el subchasis delantero.</i>	103
<i>Figura 7.12: Muestra de uno de los bujes desechados. Este diseño estaba planteado para ser fabricado en hierro, partiendo de un tubo de grandes dimensiones y dos planchas cortadas por láser, dobladas y soldadas al tubo.</i>	105
<i>Figura 7.13: Diseño final del buje MT2-DI-04-01.</i>	105
<i>Figura 7.14: Durante la primera y la segunda fase del mecanizado del buje se realizan los agujeros pasantes y se mecanizan las dos caras planas como la que aparece en esta imagen.</i>	106
<i>Figura 7.15: Detalle del corte del buje. Se puede apreciar la necesidad de mecanizar desde tres direcciones distintas para lograr realizar todos los vaciados.</i>	106
<i>Figura 7.16 : Ángulo de lanzamiento del eje de la dirección. Como se puede observar, este ángulo viene definido por la posición en el espacio del buje. Por tanto, depende completamente de los puntos de anclaje del buje.</i>	107
<i>Figura 7.17: Características de los rodamientos SKF AXW 20.</i>	107
<i>Figura 7.18: Diseño final de la horquilla de dirección MT2-DI-03-01.</i>	108
<i>Figura 7.19: Unión entre la horquilla de dirección y la tija inferior mediante la pletina de dirección.</i>	109
<i>Figura 7.20: Vistas del eje sobre el que pivota la horquilla de dirección.</i>	109

<i>Figura 7.21: Horquilla de dirección presentada sobre la horquilla de suspensión.</i>	110
<i>Figura 7.22: Corte del mecanismo de unión entre sistema de dirección y sistema de suspensión.</i>	111
<i>Figura 7.23: Máximo pivotamiento posible de la tija inferior: 11.114°.</i>	111
<i>Figura 7.24: Unión entre la horquilla de dirección y el buje.</i>	112
<i>Figura 7.25: Características de los rodamientos SKF 32004 X/Q</i>	112
<i>Figura 7.26: Características de la rótula SKF GEH 15 C</i>	113
<i>Figura 7.27: Amortiguador de dirección cedido por Öhlins.</i>	113
<i>Figura 7.28: Esquema de montaje del amortiguador de dirección.</i>	114
<i>Figura 7.29: Sistema de frenado montado sobre el buje.</i>	115
<i>Figura 7.30: Esquema de fuerzas soportadas por la horquilla de dirección.</i>	116
<i>Figura 7.31: Pinzas de freno cedidas por Brembo.</i>	116
<i>Figura 7.32: Montaje de la pletina de dirección.</i>	117
<i>Figura 7.33: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-02-01.</i>	117
<i>Figura 7.34: Corte del mecanismo de transmisión del par de giro.</i>	118
<i>Figura 7.35: Funcionamiento del mecanismo de transmisión del giro.</i>	118
<i>Figura 7.36: Esquema del trabajo del conjunto de botellas telescópicas durante el funcionamiento de la suspensión.</i>	119
<i>Figura 7.37: corte del conjunto MT2-DI-00-00.</i>	119
<i>Figura 7.38: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-00-01</i>	120
<i>Figura 7.39: Características de los rodamientos SKF 7201 BECBP</i>	121
<i>Figura 7.40: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-00-02.</i>	121
<i>Figura 7.41: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-00-03</i>	122
<i>Figura 7.42: Corte de la pieza MT2-DI-00-03 en su montaje final.</i>	123
<i>Figura 7.43: Corte de la pieza MT2-DI-00-03 en su montaje final con la suspensión totalmente comprimida.</i>	123
<i>Figura 7.44: Características de la rótula Midwest Control FM-M12.</i>	124
<i>Figura 7.45: Pieza MT2-DI-00-04.</i>	124
<i>Figura 7.46: Pieza MT2-DI-00-04 en su montaje final, con la suspensión totalmente comprimida.</i>	125
<i>Figura 7.47: Pieza MT2-DI-00-05.</i>	126
<i>Figura 7.48: Pieza MT2-DI-00-06.</i>	126
<i>Figura 7.49: Pieza MT2-DI-00-06 roscada sobre la pieza MT2-DI-00-05</i>	127
<i>Figura 7.50: Pieza MT2-DI-00-07.</i>	127
<i>Figura 7.51: Pieza MT2-DI-00-07 roscada sobre la pieza MT2-DI-00-04</i>	128
<i>Figura 7.52: Pieza MT2-DI-00-08 (izda.). Montaje final de la pieza MT2-DO-00-08 (dcha.).</i>	129
<i>Figura 7.53: Detalle del anclaje de la pieza MT2-DI-00-08.</i>	129
<i>Figura 7.54: Montaje final del muelle.</i>	130
<i>Figura 7.55: Ángulo máximo que el conjunto es capaz de pivotar alrededor de las rótulas.</i>	131
<i>Figura 7.56: Espacios libres para el funcionamiento del conjunto MT2-DI-00-00.</i>	131
<i>Figura 7.57: Corte del conjunto MT2-DI-01-00</i>	132
<i>Figura 7.58: Pieza MT2-DI-01-01.</i>	133
<i>Figura 7.59: Pieza MT2-DI-01-03.</i>	133
<i>Figura 7.60: Pieza MT2-DI-01-02.</i>	133
<i>Figura 7.61: Detalle del alojamiento de la pipa de dirección.</i>	134
<i>Figura 7.62: Corte de los conjuntos MT2-DI-01-00 y MT2-DI-00-00 instalados sobre la motocicleta.</i>	

.....	134
<i>Figura 8.1: Modelo gráfico usado para las simulaciones de sólido rígido.</i>	136
<i>Figura 8.2: Modelo gráfico de la suspensión comprimida.</i>	136
<i>Figura 8.3: Esquema del recorrido de la suspensión delantera.</i>	137
<i>Figura 8.4: Posición del centro de masas de la rueda en a lo largo del tiempo.</i>	137
<i>Figura 8.5: Desplazamiento de la tija inferior.</i>	138
<i>Figura 8.6: Rotación de la horquilla de la suspensión a lo largo del tiempo.</i>	138
<i>Figura 8.7: Ángulo pivotado por la tija inferior (MT2-DI-00-02) con respecto a la horquilla de dirección a lo largo del tiempo.</i>	139
<i>Figura 8.8: Rotación de las botellas telescópicas (conjunto MT2-DI-00-00) con respecto a su posición original.</i>	140
<i>Figura 8.9: Compresión de las horquillas telescópicas (MT2-DI-00-00).</i>	140
<i>Figura 8.11: Unión a presión entre las piezas MT2-DI-00-01 y MT2-DI-00-03.</i>	142
<i>Figura 8.12: Detalles de la configuración de la interfase.</i>	142
<i>Figura 8.13: Modelado del tornillo virtual.</i>	143
<i>Figura 8.14: Representación gráfica de la condición de deslizamiento.</i>	143
<i>Figura 8.15: Superficies a las que se les ha aplicado la condición de deslizamiento.</i>	144
<i>Figura 8.16: Representación de la "virtual part" que simula el semimanillar.</i>	145
<i>Figura 8.17: Detalles de la configuración de la aplicación de la carga.</i>	145
<i>Figura 8.18: Detalles de la definición de la malla.</i>	146
<i>Figura 8.19: Superficie refinada y detalle de la configuración del refinado.</i>	146
<i>Figura 8.20: Superficie refinada y detalle de la configuración del refinado.</i>	147
<i>Figura 8.21: Malla utilizada en el análisis.</i>	147
<i>Figura 8.22: Detalle del refinado.</i>	148
<i>Figura 8.23: Representación cromática de las tensiones sufridas por la pieza.</i>	148
<i>Figura 8.24: Detalle de la máxima tensión sufrida.</i>	149
<i>Figura 8.25: Subconjunto a analizar.</i>	149
<i>Figura 8.26: Interfaces entre el eje y las mordazas.</i>	150
<i>Figura 8.27: Empotramientos aplicados.</i>	150
<i>Figura 8.28: Detalle de la aplicación de las cargas distribuidas sobre el eje.</i>	151
<i>Figura 8.29: Detalle de la configuración de la malla empleada en el eje.</i>	151
<i>Figura 8.30: Características de la malla empleada en las mordazas.</i>	152
<i>Figura 8.31: Refinamiento en la zona de mayor cúmulo de tensiones.</i>	152
<i>Figura 8.32: Refinamiento en las proximidades de la zona de mayor cúmulo de tensiones.</i>	153
<i>Figura 8.33: Mallado final del subconjunto de la pipa de dirección.</i>	153
<i>Figura 8.34: Detalle de la zona refinada.</i>	154
<i>Figura 8.35: Representación cromática de las tensiones sufridas.</i>	154
<i>Figura 8.36: Detalle al corte de la zona de mayores tensiones.</i>	155
<i>Figura 8.37: Subconjunto analizado.</i>	155
<i>Figura 8.38: Detalle de las condiciones de interfase impuestas entre las botellas telescópicas.</i>	156
<i>Figura 8.39: Detalle de las condiciones de interfase impuestas entre la botella inferior y la tija inferior.</i>	157
<i>Figura 8.40: Unión rígida entre las dos cabezas de las botellas telescópicas, simulando el efecto de la tija superior.</i>	157

<i>Figura 8.41: Representación de la condición slider impuesta en el alojamiento del eje.</i>	158
<i>Figura 8.42: Representación gráfica de los empotramientos impuestos en los anclajes de la pletina de dirección.</i>	158
<i>Figura 8.43: "Virtual parts" simulando los semimanillares.</i>	159
<i>Figura 8.44: Distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de giro del conjunto.</i>	159
<i>Figura 8.45: Detalle de la aplicación de la fuerza sobre los semimanillares.</i>	160
<i>Figura 8.46: Detalle de la configuración de la malla de las botellas superiores e inferiores.</i>	160
<i>Figura 8.47: Detalle de la configuración de la malla de la tija.</i>	161
<i>Figura 8.48: Detalle de la zona refinada y la configuración del refinado.</i>	161
<i>Figura 8.49: Malla final del subconjunto.</i>	162
<i>Figura 8.50: Detalle de la zona refinada.</i>	162
<i>Figura 8.51: Representación gráfica de las tensiones sufridas por el subconjunto.</i>	163
<i>Figura 8.52: Detalle de la zona con mayor tensión.</i>	163
<i>Figura 8.53: Representación cromática de los vectores de desplazamiento de cada uno de los nodos de la malla.</i>	164
<i>Figura 8.54: "Virtual part" simulando el buje.</i>	165
<i>Figura 8.55: Detalle de la definición de la malla.</i>	165
<i>Figura 8.56: Malla final.</i>	166
<i>Figura 8.57: Empotramiento aplicado sobre la "virtual part" que define el buje.</i>	167
<i>Figura 8.58: Representación gráfica de la condición de "slider" impuesta en el alojamiento del eje.</i>	167
<i>Figura 8.59: Momento aplicado alrededor del eje de dirección.</i>	168
<i>Figura 8.60: Detalle de la definición del momento aplicado.</i>	168
<i>Figura 8.61: Detalle del refinado en el alojamiento del buje.</i>	169
<i>Figura 8.62: Detalle del refinado en los anclajes de la horquilla de dirección.</i>	169
<i>Figura 8.63: Configuración del refinado.</i>	169
<i>Figura 8.64: Representación gráfica de las tensiones sufridas por la pieza.</i>	170
<i>Figura 8.65: Detalle de las zonas con mayor tensión. Arriba, una vista general de la zona. Abajo, una vista particular de la malla en dicho punto.</i>	170
<i>Figura 8.66: Representación gráfica de los vectores del desplazamiento de los nodos de la malla.</i>	171
<i>Figura 8.67: Distancia desde el nodo de mayor desplazamiento hasta el eje de giro.</i>	171
<i>Figura 8.68: Detalle de las condiciones de frontera impuestas en la "virtual part" que simula el buje.</i>	172
<i>Figura 8.69: Detalle de las cargas aplicadas sobre la "virtual part" que simula el buje".</i>	173
<i>Figura 8.70: Detalle de las zonas refinadas. Arriba el alojamiento del eje. Abajo los anclajes al buje.</i>	173
<i>Figura 8.71: Representación gráfica de las tensiones sufridas por la pieza durante la frenada.</i>	174
<i>Figura 8.72: Detalle de las tensiones sufridas en las zonas refinadas.</i>	174
<i>Figura 8.73: Carga aplicada en el anclaje del amortiguador de dirección.</i>	176
<i>Figura 8.74: Refinado de la malla en el anclaje del amortiguador de dirección.</i>	176
<i>Figura 8.75: Representación gráfica de las tensiones sufridas por la horquilla de dirección.</i>	177
<i>Figura 8.76: Detalle de la zona que sufre mayores tensiones.</i>	177
<i>Figura 8.77: Detalle de las tensiones en el anclaje del amortiguador de dirección.</i>	178
<i>Figura 8.78: Representación de los vectores de desplazamiento de los nodos de la malla.</i>	178

<i>Figura 8.79: Detalle del apoyo entre buje y eje de dirección.</i>	179
<i>Figura 8.80: Condición de slider aplicado sobre el eje de dirección y el apoyo del mismo en el buje.</i>	180
<i>Figura 8.81: "Virtual part" simulando la horquilla de dirección.</i>	180
<i>Figura 8.82: Configuración de la condición de contorno aplicada.</i>	181
<i>Figura 8.83: Modelado de las pinzas de freno con "virtual parts" y las cargas que éstas aplican sobre el buje.</i>	181
<i>Figura 8.84: Configuración de la carga aplicada sobre las pinzas de freno virtuales.</i>	182
<i>Figura 8.85: Carga radial en el apoyo de los rodamientos.</i>	183
<i>Figura 8.86: Definición de las cargas radiales aplicadas sobre el buje.</i>	184
<i>Figura 8.87: Definición de la malla.</i>	184
<i>Figura 8.88: Malla final.</i>	185
<i>Figura 8.89: Refinado de la malla en el apoyo del eje de dirección.</i>	185
<i>Figura 8.90: Representación gráfica de las tensiones sufridas por el buje.</i>	186
<i>Figura 8.91: Detalle de las máximas tensiones sufridas.</i>	186

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: Comparación del avance de la dirección entre motocicletas de distintos segmentos de mercado.....</i>	31
<i>Tabla 2.2: Comparación entre los ángulos de lanzamiento del eje de dirección de distintas motocicletas.</i>	35
<i>Tabla 2.3: Comparación entre la distancia entre ejes de diversas motocicletas.....</i>	37
<i>Tabla 6.1: Datos de la prueba realizada en el circuito de Albacete.</i>	85
<i>Tabla 7.1: Comparación entre las geometrías de LaMoto2 y la Honda CBR 600.....</i>	104
<i>Tabla 7.2: Características del muelle VANEL C.223.180.2000.A</i>	130
<i>Tabla 8.1: Ángulos y desplazamientos máximos que permite el sistema de dirección.</i>	135
<i>Tabla 8.2: Características del aluminio 7075 T6</i>	141
<i>Tabla 9.1: Presupuesto licencias de software</i>	189
<i>Tabla 9.2: Presupuesto trabajo de ingeniería</i>	189
<i>Tabla 9.3: Presupuesto ensayos extensometría</i>	190
<i>Tabla 9.4: Presupuesto realización de la memoria</i>	190

1. Introducción al proyecto

La motocicleta es, a día de hoy, uno de los medios de transporte más utilizados a lo largo del mundo. Especialmente en los países en vías de desarrollo en los que un automóvil supone un gasto imposible de afrontar. Esta proliferación de la motocicleta se ve igualmente reflejada en su faceta de ocio, que tiene su máximo exponente en entorno de la competición.

Este nuevo medio nace a finales del siglo XIX como una evolución del concepto de la bicicleta, y se reduce a un sencillo esquema que consta de una estructura rígida a la que se acoplan dos ruedas sobre las que se desplaza el vehículo, y un elemento motor que impulsa una de las dos ruedas. Este sencillo esquema permite grandes velocidades de desplazamiento y un abanico infinito de posibilidades. Como cualquier otro vehículo a motor, es necesario un profundo estudio de su funcionamiento y componentes desde el punto de vista de la ingeniería, en aras de mejorar la seguridad de sus usuarios y optimizar su funcionamiento.

Uno de los principales elementos que forman la base de este estudio es la suspensión. La suspensión conforma el medio de unión entre cada una de las ruedas de la motocicleta y la estructura rígida (chasis) que soporta el conjunto. La suspensión nace a raíz de la motocicleta como concepto de bicicleta con motor, y en un principio está orientada a mejorar el confort de sus usuarios. Sin embargo, con el paso de los años la motocicleta comienza a separarse de su planteamiento inicial y empieza a aumentar sus capacidades y prestaciones, por lo que pronto se pone de relieve que la función de la suspensión debe estar dirigida a mejorar la estabilidad y capacidad de agarre de la motocicleta.

Es por todo ello que la horquilla telescópica, surgida alrededor de 1930 y nacida de esa herencia de la bicicleta, no tiene sentido dentro de la concepción actual de la motocicleta. Sin embargo, hasta el día de hoy, gracias a su largo desarrollo industrial y al profundo conocimiento que se tiene de este sistema, la horquilla telescópica sigue manteniendo su hegemonía frente al resto de sistemas alternativos. Hay que añadir además, que muchos de los sistemas de suspensión delanteros que se han desarrollado en los últimos años no han logrado tener éxito entre los usuarios de la motocicleta por diferentes motivos, principalmente relacionados con problemas en la interacción usuario-motocicleta.

Dentro de todas esas iniciativas que promueven la evolución tecnológica de la motocicleta, se encuentra la competición MotoStudent. Se trata de una competición interuniversitaria en la que se promueve la búsqueda de nuevas tecnologías y soluciones frente a los distintos retos tecnológicos que plantea la motocicleta. En la práctica consiste en el diseño y fabricación de una motocicleta de pequeña cilindrada para hacerla competir contra las motocicletas de otras universidades en una serie de pruebas que premian distintos aspectos tecnológicos de las mismas.

Dentro del equipo MotoStudent de la Universidad Carlos III existe una gran concienciación sobre los problemas derivados del uso de la horquilla telescópica como modelo de suspensión delantera. Es por ello que, desde su creación, este grupo ha intentado plantear distintas soluciones a esa problemática. Sin embargo, ante la falta de medios, resultaba imposible el desarrollo físico de una motocicleta con suspensión alternativa dentro del seno del proyecto MotoStudent. Para poder

continuar investigando nuevas alternativas y beneficiarse de los conocimientos adquiridos, se decidió realizar un diseño de un sistema de dirección y suspensión alternativas fuera del grupo MotoStudent pero cuya experiencia pudiera ser usada dentro del mismo. De esta manera, este trabajo se llevó a cabo sobre la moto diseñada dentro del proyecto “LaMoto2”¹.

Debido a mi gran pasión por el mundo de la motocicleta y en particular por la ingeniería aplicada a la competición, en cuanto tuve noticia de este proyecto, comencé a interesarme por la mejor manera para colaborar en él. A principios de 2011 tuve la oportunidad de entrar a formar parte del equipo, en el cual he permanecido hasta el día de hoy. Durante este tiempo, mi principal cometido ha sido el diseño de la columna de dirección partiendo desde un concepto inicial que ya había sido bocetado antes de mi incorporación.

El presente trabajo de fin de grado surge a raíz mi experiencia en el seno del proyecto “LaMoto2”. Además, tal y como se ha explicado, este trabajo también tiene la intención de servir de experiencia para los demás integrantes del proyecto MotoStudent de la Universidad Carlos III.

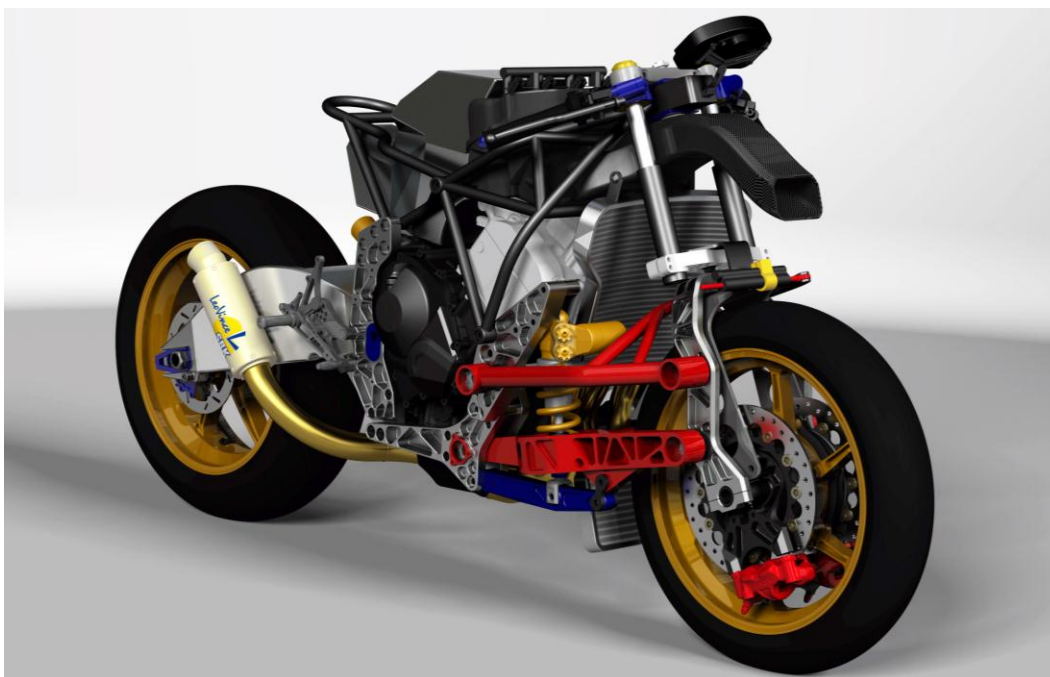


Figura 1.1: Estado de desarrollo actual del diseño de la motocicleta del proyecto LaMoto2

¹ Durante el documento se usa la expresión “LaMoto2” como “la motocicleta diseñada en el seno del proyecto ‘LaMoto2’”. También, se usa la expresión “el proyecto” al referirse a “el proyecto ‘LaMoto2’”.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

A la hora de plantear el trabajo, era necesario partir de unos objetivos a largo plazo que orientasen todas las acciones y motivasen los requisitos. En este caso, había dos objetivos claros que se perfilaban como centrales:

- Diseñar una columna de dirección adaptada al sistema de suspensión alternativa de LaMoto2.
- Lograr un diseño que transmita la mayor cantidad de información posible al piloto.

Para poder cumplir estos dos objetivos básicos y principales, se plantearon una serie de objetivos más particulares y detallados:

- Realizar un estudio de la física que rige las suspensiones y direcciones delanteras, con la intención de poder realizar un compendio de las características que debía tener un sistema de dirección de una motocicleta de competición.
- Desarrollar una recopilación de las características que el sistema debía cumplir, de cara a la obtención de un diseño lo más satisfactorio posible.
- Plantear una metodología de diseño que asegurase el cumplimiento de todos los objetivos. Para ello fue necesario hacer una evaluación de los medios y posibilidades al alcance y de todos los condicionantes exteriores, tanto económicos como logísticos y de medios humanos.
- Lograr un diseño que se adaptase a las condiciones exigidas por una competición de alto nivel. Tanto en el aspecto de normativa como en el de exigencias mecánicas. Para ello fue necesario realizar un estudio detallado de la normativa de la competición. Además se hizo uso de procedimientos y tecnología de ingeniería inversa que permitiesen conocer las características mecánicas y dinámicas que exigía la competición objetivo.
- Diseñar un procedimiento de fabricación y un procedimiento de montaje. Que permitiera obtener un diseño final completo posible de fabricar, instalar y funcionar satisfactoriamente en LaMoto2. En este aspecto, fue de vital importancia realizar un estudio de las características y posibilidades que ofrecían los medios de fabricación disponibles, y adaptar las piezas a esos medios.

Para poder cumplir todos los objetivos, se utilizaron varias herramientas:

- **CATIA V5 (CAD/CAE):**
CATIA supone una potente herramienta que integra todas las etapas de desarrollo de un producto. Además, es un programa de gran prestigio y reconocimiento dentro de la industria, lo que aporta una gran seguridad y solidez al proyecto.
Gracias a la integración en un mismo programa del apartado de diseño (CAD) y el de análisis (CAE), ha sido posible comprobar en tiempo real los efectos de cualquier cambio en el diseño sobre el comportamiento mecánico del sistema.

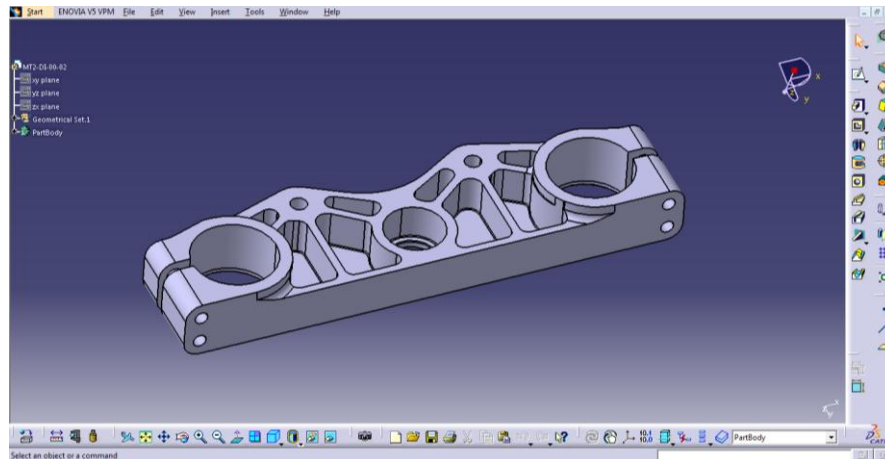


Figura 1.2: Interfaz gráfica del programa CATIA V5

- **Working Model** (Software de simulación dinámica de sólidos rígidos):

Durante la realización del presente documento, se ha hecho uso del programa Working Model 2D gracias a la licencia docente que posee la Universidad Carlos III. Este software de simulación de sólido rígido ha sido utilizado para calcular las geometrías y el comportamiento dinámico de los mecanismos. Este programa permite sustituir los clásicos modelos de dinámica matemáticos por modelos gráficos, más fáciles de interpretar, y de construir, sin perder por ello ningún tipo de fiabilidad en el resultado.

El software permite simular las interacciones entre elementos 2D rígidos, con uniones mediante rótulas, deslizaderas y otros elementos como muelles o amortiguadores. De esta manera se puede conocer las posiciones, velocidades y aceleraciones de cada uno de los componentes del sistema. Es especialmente útil para analizar geometrías de mecanismos.

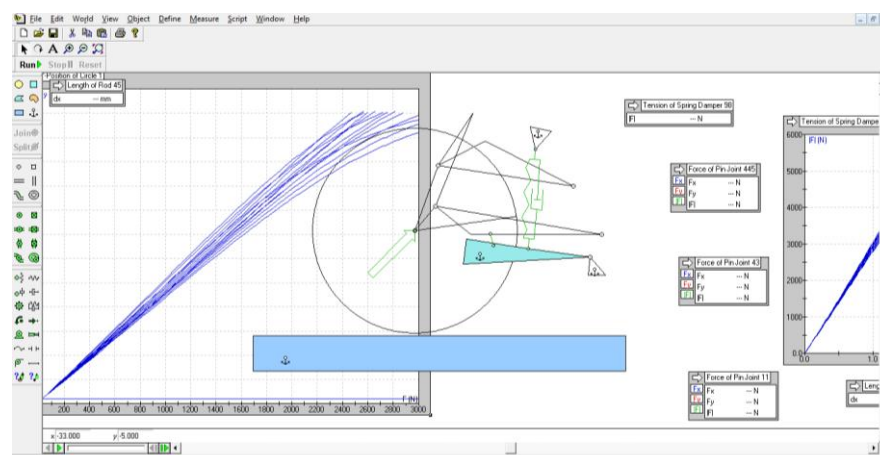


Figura 1.3: Interfaz gráfica del programa Working Model

- **Sistemas de medición a distancia** (Telemetría)

Para comprender en profundidad las condiciones de trabajo de una motocicleta de competición, se ha utilizado una herramienta muy usada en ese ámbito: la telemetría. Se

trata de una herramienta que permite medir a distancia varias magnitudes físicas. En el caso de las motocicletas suele incluir mediciones de posición y velocidad (GPS), aceleraciones en todas las direcciones (acelerómetros), revoluciones del motor, marcha engranada, inclinación de la motocicleta (mediante giroscopio), y recorrido y velocidad del trabajo de las suspensiones.

Estas mediciones se han realizado utilizando equipos de medición de la empresa Race Techonlogy.

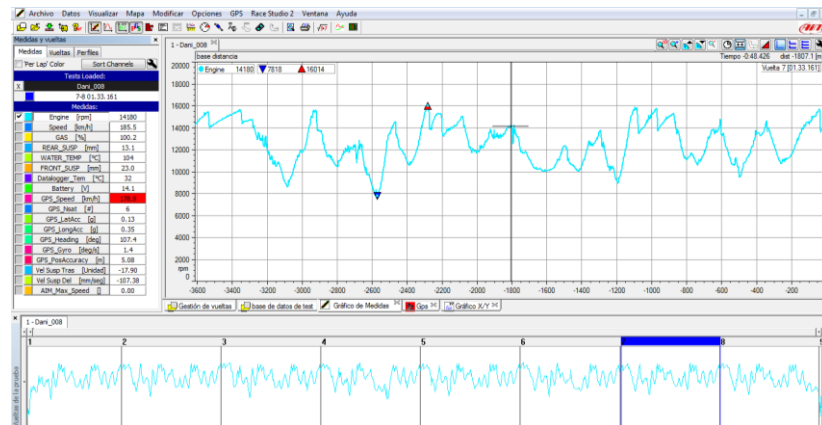


Figura 1.4: Interfaz gráfica del software de análisis de los datos obtenidos mediante telemetría

- **Sistemas de medición de deformaciones (Extensometría)**

La extensometría es una técnica experimental utilizada para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un cable conductor al cambiar su longitud y sección transversal.

Para realizar estas mediciones se usan unos dispositivos conocidos como galgas, que son adheridos a la superficie del material a medir. Estas galgas llevan en su interior un cable conductor, cuya resistencia varía al deformarse la superficie de la pieza a la que se encuentra adherido. Al medirse la variación de estas resistencias se puede conocer la deformación de la superficie en el punto en el que se ha pegado la galga.



Figura 1.5: Ejemplo de galga extensométrica

Para los ensayos de extensometría realizados se han usado equipos de medición cedidos por la empresa HBM.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

A la hora de presentar el desarrollo del trabajo se ha intentado seguir un esquema lógico mediante el que presentar las distintas fases de las que ha constado el diseño de la columna de dirección:

- En el capítulo 2 “Física de la motocicleta” se realiza un estudio de la dinámica de las motocicletas. En este estudio se muestran y explican los aspectos más importantes que rigen la física de este tipo de vehículos en lo que a los sistemas de suspensión y dirección se refiere. De esta manera, se puede dar paso a la realización de una lista de requerimientos de dichos sistemas.
- En el capítulo 3 “Reseña histórica y estado del arte” se hace un repaso a los diseños de suspensiones a lo largo de la historia y un breve análisis del estado del arte con la intención de no caer en errores ya cometidos por otros autores.
- En el capítulo 4 “La suspensión delantera” se detallan el funcionamiento y las características de la suspensión delantera de LaMoto2. El sistema de dirección está íntimamente ligado con el sistema de suspensión delantero, por ello, aunque el sistema de suspensión no sea objeto del presente documento, es de vital importancia conocer su funcionamiento en conjunto con la dirección.
- En el capítulo 5 “Metodología de diseño” se presenta el concepto preliminar del que parte el diseño de la dirección que ocupa este documento. Partiendo de ese boceto inicial, se establece una metodología de diseño que se ha seguido durante todo el proceso.
- En el capítulo 6 “Ensayos previos” se detallan los ensayos experimentales que fueron realizados de cara a obtener datos sobre las condiciones en las que el mecanismo a diseñar debía trabajar.
- En el capítulo 7 “Diseño de la dirección” se explica en detalle el proceso de diseño y el resultado final con todas y cada una de las piezas que componen la columna de dirección.
- En el capítulo 8 “Cálculos justificativos” se presentan y se comentan los cálculos y análisis que se han realizado sobre el diseño final como justificación de la validez del mismo. De esta manera se comprueba si el sistema cumple las características requeridas o no.
- En el capítulo 9 “Trabajos futuros”, se presenta una serie de vías de desarrollo propuestas por el autor para aumentar las prestaciones del sistema de dirección diseñado.
- En el capítulo 10 se presentan las conclusiones del autor.
- En el anexo aparecen detallados los planos finales del sistema, y toda la documentación adicional que pueda resultar de interés para el lector.

2. Física de la motocicleta

Antes de abordar con profundidad la elección del sistema de suspensión y de dirección, para poder entender la razón de su elección, se hace necesario repasar los conceptos clave que rigen la física de las motocicletas, especialmente en lo concerniente a la suspensión delantera.

2.1. DEFINICIONES BÁSICAS

Previamente la explicación de la física que rige el comportamiento de las motocicletas, es necesario sentar unas bases previas relativas a los conceptos básicos de la dinámica de la motocicleta de manera que el lector del documento se encuentre completamente seguro de la definición de los términos a los que se hace referencia a lo largo del mismo.

- **Manejabilidad/Agilidad:** Estos dos términos, la mayoría de veces usados indistintamente, indican la facilidad, la rapidez (sobre todo cuando se habla de agilidad) y la fidelidad con la que una motocicleta responde a las acciones del piloto. Depende fundamentalmente de la geometría de la dirección, la rigidez del chasis, el peso, la distribución del mismo y del tipo de neumáticos que lleve instalados.
- **Adherencia:** En la mayoría de casos se refiere a la fuerza de rozamiento máxima que pueden generar los neumáticos antes de comenzar a deslizarse (esto en las motocicletas es realmente importante, porque deslizarse no solo implica ir más despacio, en la mayoría de casos implica sufrir un accidente). Sin embargo, en algunos casos puede referirse a la efectividad con la que un sistema de suspensión mantiene el contacto rueda-suelo.
- **Estabilidad:** La estabilidad tiene dos maneras de definirse, pero en la práctica ambas describen el mismo fenómeno. Por un lado puede describirse como la capacidad que una motocicleta tiene para mantener la maniobra propuesta por el piloto sin que exista una tendencia inherente a salirse de la trayectoria. Por otro lado, también puede definirse como la capacidad que tiene una motocicleta para volver a la maniobra propuesta inicialmente cuando alguna fuerza externa produce una perturbación.

SISTEMA DE REFERENCIA

Las motocicletas, como cualquier cuerpo libre, tienen 6 grados de libertad, tres de traslación y otros tres de rotación. Por tanto, es de gran importancia definirlos previamente para evitar posibles confusiones.

El origen del sistema de referencia se encuentra en el centro de gravedad de la motocicleta. El eje de guiñada es un eje que atraviesa la motocicleta de arriba abajo, cuando la motocicleta está situada sobre una superficie horizontal, y se encuentra perfectamente vertical, este eje coincide con una normal a la superficie. El eje de inclinación recorre la motocicleta de delante hacia atrás y, cuando ésta circula en línea recta, coincide con la dirección del movimiento. El eje de cabeceo es un eje perpendicular a los dos definidos anteriormente, atraviesa la motocicleta de lado a lado, y

cuando esta se encuentra perfectamente vertical, el eje es completamente horizontal.

Los diferentes movimientos lineales que la motocicleta puede realizar se conocen como: desplazamiento vertical (a lo largo del eje de guiñada), desplazamiento lateral (eje de cabeceo) y desplazamiento o avance (a lo largo del eje de inclinación). Por su parte, los movimientos angulares reciben el mismo nombre que el eje alrededor del que tienen lugar.

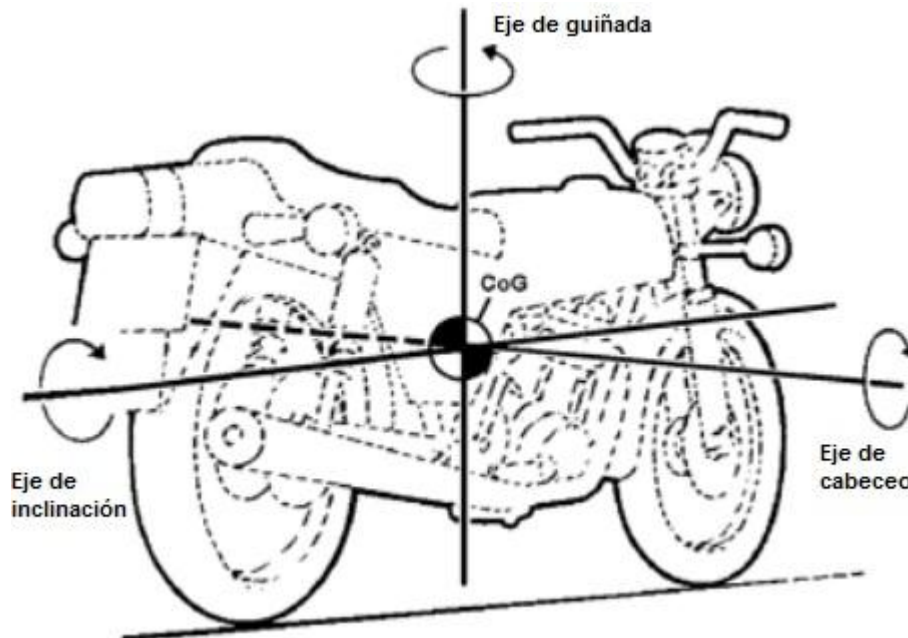


Figura 2.1: sistema de referencia usado en las motocicletas.

2.2. FÍSICA DE LA MOTOCICLETA

La característica fundamental de las motocicletas es su condición de “péndulo invertido”. Un péndulo normal, tiene el punto de rotación por encima de su centro de gravedad, se trata de un sistema estable, lo que significa que, ante cualquier perturbación, el sistema tiende a volver a su punto de origen. Sin embargo, en un péndulo invertido, el centro de gravedad del sistema se encuentra por encima de su punto de rotación. Esto significa que, ante cualquier perturbación, la desalienación entre centro de gravedad y punto de apoyo, producirá un par de fuerzas que alejarán aún más el sistema de su punto inicial, dicho de otro modo, conforma un sistema inestable.

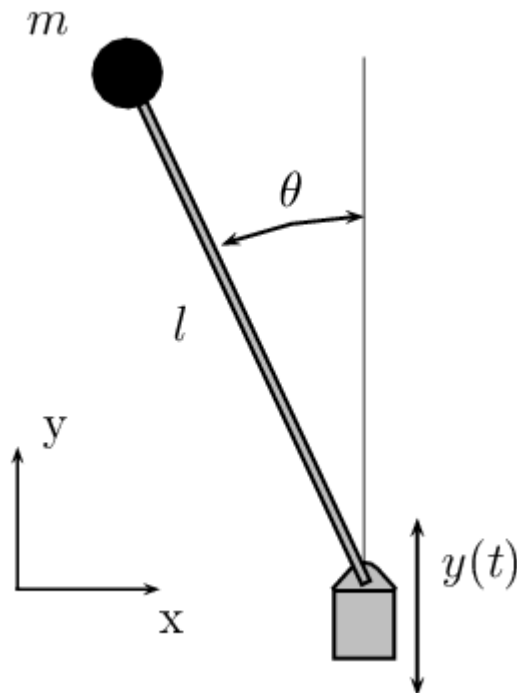


Figura 2.2: Péndulo invertido

Esta característica hace que las motocicletas no tengan estabilidad lateral cuando se encuentran en reposo y solo sean capaces de conseguirla cuando se encuentran en movimiento. Durante el movimiento rectilíneo esta estabilidad se logra a base de un continuo movimiento de zigzag que logra mantener las ruedas bajo el centro de gravedad. Mientras que para lograr dicha estabilidad al negociar una curva, se hace necesario inclinar la motocicleta para compensar el par de fuerzas imbuido por la fuerza centrífuga, con otro par de fuerzas provocado por la atracción gravitacional. Todo esto supone que la dinámica de las motocicletas conforma un sistema mucho más complejo de estudiar que en el caso de otros vehículos como puede ser un automóvil.

Longitudinalmente, si son sistemas estables debido a sus dos puntos de apoyo. Sin embargo, en la mayoría de casos las motocicletas tienen un centro de masas a gran distancia del suelo, lo que unido a su, normalmente corta, distancia entre ejes, supone que una de las dos ruedas pueda despegarse del suelo si se produce la suficiente aceleración o deceleración. Esta situación puede darse tanto durante la fase de frenada como durante la fase de aceleración, y además de ser una circunstancia peligrosa para la integridad del piloto y de la máquina, también supone una merma en la capacidad adherente de la misma.

En cuanto a las fuerzas que actúan sobre la motocicleta y sus componentes, si ésta y el piloto son considerados un solo sistema, dichas fuerzas pueden dividirse en dos grupos principales: externas e internas. Las fuerzas externas son aquellas producidas por la gravedad, la resistencia aerodinámica, el rozamiento entre los neumáticos y el suelo, las fuerzas centrífugas... Mientras que las fuerzas internas son aquellas provocadas por el piloto y usadas para dirigir la moto, como pueden ser el momento aplicado sobre el sistema de dirección, el rozamiento producido en los discos de freno.

En el primer grupo la principal fuerza es, como ocurre con todos los objetos con masa, la gravedad

que tira del piloto y la motocicleta hacia el suelo. Mientras, en cada una de las dos huellas de contacto surgen fuerzas verticales de reacción que contrarrestan este efecto. Estas fuerzas verticales vienen definidas por la masa del conjunto motocicleta-piloto, por la localización del centro de gravedad, pero también por la aceleración longitudinal del sistema (transferencia de pesos) o las irregularidades del pavimento, pudiendo variar durante la circulación entre el 0% y más del 100% del peso del conjunto. En la huella de contacto también tienen lugar fuerzas horizontales, éstas son producidas por las fuerzas de rozamiento entre el suelo y el neumático y, aunque están presentes todo el tiempo en forma de resistencia a la rodadura, son más notorias durante la fase de frenada y aceleración. En este grupo también está presente la fuerza aerodinámica que, principalmente, es debida a la resistencia aerodinámica, pero también puede estar provocada por los efectos del viento lateral. También hay que recordar las fuerzas producidas durante el giro de la motocicleta, tanto las componentes laterales que se producen en el neumático, debidas al ángulo de deriva, como la fuerza centrífuga que el conjunto experimenta debido a la aceleración lateral presente en todos los giros.

En el grupo de las fuerzas internas del sistema motocicleta-piloto se encuentra, principalmente, el momento que el piloto ejerce sobre el sistema de dirección (una de las características que diferencian el comportamiento dinámico de las motocicletas de otros vehículos, es que el control que sobre ellas ejerce el piloto, no está definido de forma principal por la posición real del sistema de dirección, si no por los esfuerzos que sobre el mismo se aplican). Además de este momento, dentro de las fuerzas internas también se encuentran otras fuerzas que no están provocadas directamente por el piloto, pero le sirven a éste para manejar la motocicleta. Entre ellas se encuentran el rozamiento entre las pinzas de freno y los discos, o el par producido por el motor. Por último, dentro de las fuerzas internas, también existe un grupo de fuerzas que no están provocadas ni controladas por el piloto, como pueden ser las fuerzas internas de las suspensiones, las fuerzas entre los sistemas de suspensión y el chasis, o las fuerzas producidas por el tiro de la cadena (éstas últimas realmente críticas durante la fase de aceleración).

2.2.1 Esquema longitudinal

Para comprender el funcionamiento dinámico de las suspensiones de una motocicleta, es de gran utilidad estudiar por separado la dinámica longitudinal y la dinámica lateral. Para el primer caso, resulta muy didáctico imaginarla como un conjunto de masas, muelles y amortiguadores funcionando en diversas configuraciones en paralelo y serie y afectados por las diversas fuerzas que se han mencionado anteriormente.

En la figura 2.3, aparecen representados los principales responsables del comportamiento dinámico de una motocicleta. En el modelo del chasis se incluye su centro de gravedad, y su momento de inercia, mientras que por debajo del mismo, están representados los sistemas de amortiguación delantero y trasero, las masas no suspendidas y un modelado de los neumáticos. A pesar de la aparente sencillez que puede plantear el esquema, conforma un sistema muy acoplado, y cualquier desviación de uno de los parámetros, por pequeña que sea, tiene una fuerte influencia en el resto.

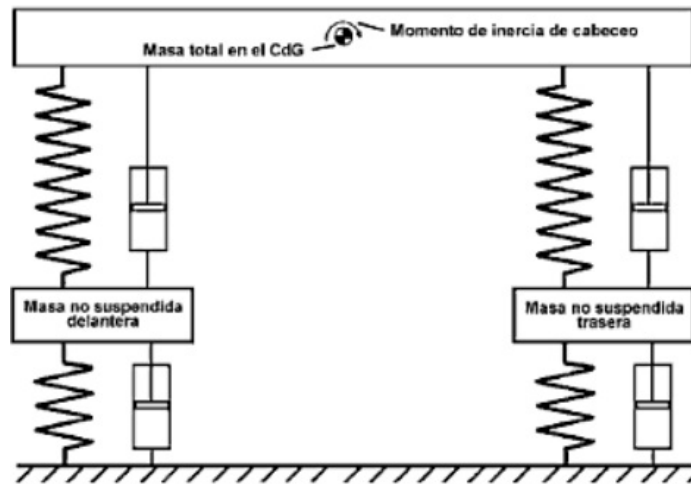


Figura 2.3: Esquema lateral de sólido rígido de una motocicleta.

Visto de esta manera, es fácil entender que, dinámicamente, la principal función que un chasis realiza en una motocicleta consiste en mantener rígidamente unidas las suspensiones delantera y trasera. Para que la trayectoria que siga la motocicleta sea precisa y responda a las órdenes del piloto, es necesario que el chasis sea lo más rígido posible (más adelante se verá que esta idea tiene algunos matices). Tener un chasis que permita un excesivo desplazamiento lateral de las ruedas, supone algo similar a incluir un grado de libertad en el mecanismo que el usuario no puede controlar, lo que implicará que la motocicleta no responda correctamente a las órdenes del piloto, haciéndola difícil y peligrosa de manejar, o incluso imposible. Por otro lado, un chasis que permita un excesivo desplazamiento de las ruedas en sentido longitudinal, supondrá tener una motocicleta cuyas geometrías se vean alteradas continuamente, lo que supone cambiar el comportamiento de la moto.

En cuanto a la suspensión, la función que ésta tiene en una moto de competición se restringe únicamente a mantener un contacto neumático-suelo con la mayor presión posible en la interfase goma-asfalto, intentando conseguir la máxima adherencia posible en todas las circunstancias. Esto supone lograr un funcionamiento óptimo a lo largo de un amplio abanico de situaciones en las que la suspensión tiene que funcionar correctamente, incluso hablando del entorno de la competición, donde el confort del piloto es algo que solo se tiene en cuenta cuando pueda afectar a su rendimiento.

Uno de los principales desafíos a los que se enfrentan los ingenieros en el campo de diseño de suspensiones es el momento de la frenada. Como ya se ha mencionado anteriormente, debido a la baja relación entre la distancia entre ejes y la altura del centro de gravedad que tienen la mayoría de motocicletas (especialmente aquellas diseñadas para la competición), cuando la frenada tiene lugar, la suspensión delantera puede llegar a soportar el 100% del peso de la moto, lo que, añadiéndole las fuerzas de deceleración, supone que las cargas que soporta la suspensión delantera pueden verse triplicadas frente a las cargas que sufriría circulando a velocidad constante en recta y horizontal. Sin embargo, al mismo tiempo que tiene lugar esta fuerte sollicitación mecánica al sistema de suspensión, éste debe seguir siendo totalmente capaz de absorber las irregularidades del asfalto. De hecho, es en esta situación de circulación cuando mejor debe gestionarse la absorción de baches, puesto que una frenada a máxima potencia requiere toda la

adherencia que es capaz de proporcionar el neumático, por lo que la suspensión debe ser capaz de lograr un perfecto contacto entre la rueda y el suelo.

2.2.2 Consideraciones geométricas de la motocicleta

Partiendo del esquema básico de las motocicletas, hay distintos parámetros que influyen radicalmente en el comportamiento de éstas. Se trata de una serie de aspectos de carácter geométrico que definen distancias, ángulos, alturas... entre los distintos componentes encargados del funcionamiento de la dirección y la suspensión de la motocicleta y condicionan su comportamiento frente a distintas situaciones.

Como ocurre con cualquier aspecto del comportamiento de una motocicleta, dichos parámetros tienen unos efectos principales fáciles de identificar y una serie de efectos secundarios que afectan al resto de la motocicleta cuyo estudio es mucho más complejo.

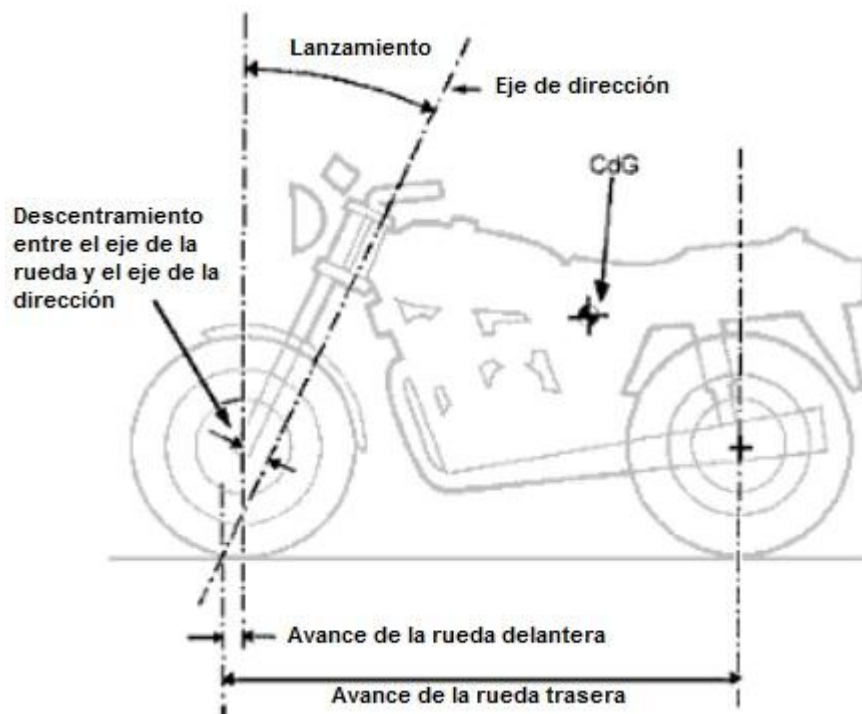


Figura 2.4: Principales parámetros de la geometría de una motocicleta

En la figura 2.4 se pueden ver los principales parámetros de la geometría de una motocicleta. A continuación se detalla una breve descripción de cada uno de ellos y una indicación de los efectos más destacables de su variación:

AVANCE

El avance es la distancia entre el centro de la huella de contacto y el eje de dirección. Puede medirse sobre el suelo o en dirección perpendicular al propio eje.

Esta distancia determina el brazo de palanca que producen sobre la dirección las fuerzas de rozamiento entre el neumático y el suelo. Es muy importante a la hora de lograr una estabilidad direccional adecuada. Cuando el punto de contacto del neumático se encuentra por detrás del eje de dirección (avance positivo), se induce un efecto de autocentrado en la rueda. Esto supone que, si cualquiera de las dos ruedas sufre un desplazamiento lateral (debido a un bache, viento etc.) gracias al avance, las fuerzas que se producen sobre la motocicleta provocan que la rueda vuelva a su posición original.

Sin embargo, alargar demasiado el avance en busca de estabilidad, comienza a ser contraproducente, a partir de cierto valor por dos motivos fundamentales: por un lado, el beneficio será cada vez menor para un mismo aumento, y por otro lado un excesivo avance supone una merma en la agilidad de la motocicleta. Se puede extraer por tanto, que las motos con un carácter más ágil tendrán un menor avance en la mayoría de casos y las motocicletas con carácter más turístico o relajado tendrán un mayor avance. En la tabla 2.1 se muestran una serie de valores típicos del avance para diversas motocicletas. En ella se puede ver que las motocicletas con carácter más deportivo son las que tienen un menor avance. Aunque, debido a la gran cantidad de factores que afectan al comportamiento final de las motocicletas, esta no es una regla que se cumpla en todas ellas.

Tabla 2.1: Comparación del avance de la dirección entre motocicletas de distintos segmentos de mercado

Motocicleta	Enfoque	Suspensión delantera	Avance
Honda CBR 600 RR	Deportiva	Convencional	98mm
Yamaha GTS	Sport/Turismo	Parker/GTS	100 mm
BMW K1300S	Sport/turismo	Doulever	104.4 mm
Suzuki Burgman	Scooter/ciudadana	Convencional	105 mm
Honda Goldwin	Turismo	Convencional	109 mm
Kawasaki er-6n	Naked/ciudadana	Convencional	110 mm
Honda Shadow	Custom	Convencional	160,9 mm

El avance es función del ángulo de lanzamiento, el rake (o descentramiento entre el eje de la rueda y el eje de dirección), y del diámetro de la rueda. Puede describirse mediante la fórmula 2.1.

$$Avance = \frac{(R_w \cdot \text{Sen}(A_h)) - O_f}{\text{Cos}(A_h)} \quad (2.1)$$

Dónde R_w es el radio de la rueda, A_h es el ángulo de lanzamiento y O_f es el rake.

Sin embargo, el avance no es la única fuente de estabilidad direccional, y existen vehículos de dos ruedas que, a pesar de tener avance negativo, siguen siendo estables. Un ejemplo de ello es el proyecto Python-Lowracer (figura 2.5 y figura 2.6).

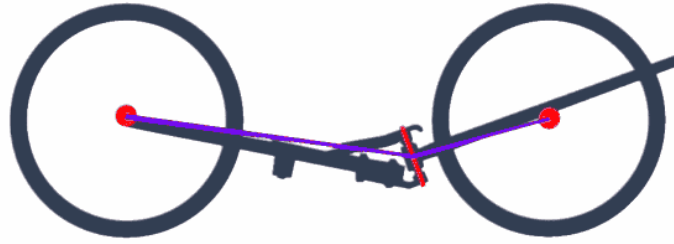


Figura 2.5: Esquema general de la Python-Lowracer.



Figura 2.6: Modelo real de la Python-Lowracer

ÁNGULO DE LANZAMIENTO

El lanzamiento es el ángulo que forma, con la vertical, el eje alrededor del que pivota la dirección cuando ésta gira. El motivo de su existencia no es fácil de explicar, y algunos autores sugieren que su existencia responde más a un propósito constructivo e histórico que a una utilidad real en la dinámica de la motocicleta^[x].

Desde luego, es imposible negar que, desde el punto de vista constructivo, el ángulo de lanzamiento facilita las cosas, ya que, con las tradicionales horquillas, reducir éste ángulo supone acercar la rueda a la zona donde habitualmente se encuentra el motor.

En la mayoría de motocicletas actuales, este ángulo se encuentra comprendido entre los 20 y los 23 grados. Sin embargo, en algunos diseños de motocicletas con tren delantero alternativo se pueden encontrar ángulos de lanzamiento entre 10 y 15 sin que su dinámica se haya visto perjudicada por ello.

Entre los efectos provocados por la variación del lanzamiento se pueden enumerar varios:

- **Variación en el avance:** Tal y como se puede ver en la figura 2.7, para un mismo avance medido en el suelo, un aumento en el ángulo de lanzamiento provoca una disminución del avance real.

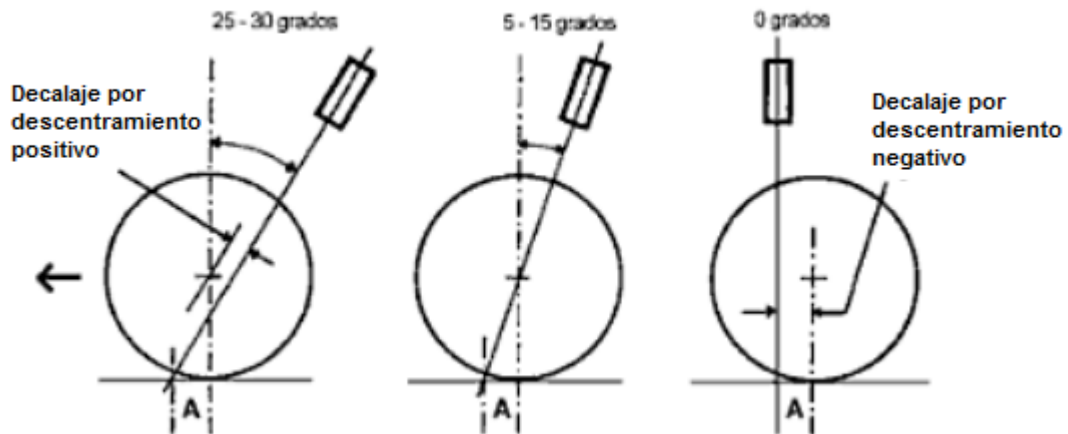


Figura 2.7: Variación del descentramiento de la horquilla en función de la variación del avance.

Es por ello, que si se pretende mantener el avance en el suelo al cambiar el ángulo de lanzamiento, es necesario alterar el rake.

De la misma manera, resulta fácil comprobar que, para una misma posición de la pipa con respecto al centro de la rueda, aumentar el lanzamiento supone aumentar el avance.

También es preciso notar que, al girar la dirección el avance varía. Con un mayor ángulo de dirección, la variación del avance por cada grado girado es mayor.

- Caída de la pipa de dirección:** Otro de los efectos que tienen lugar al incluir un ángulo de lanzamiento y un giro de la dirección en la geometría de la moto, es la “caída” de la pipa (un descenso de la altura al suelo a la que esta se encuentra). Esta caída tiene lugar para avances y lanzamientos positivos (contacto de la rueda por detrás del eje de dirección), para avances negativos y lanzamientos positivos (o viceversa), la pipa tendería a levantarse.

Esto se debe a que el plano de giro de la dirección no es paralelo al plano de apoyo de la rueda, por tanto, el movimiento producido por el giro de la dirección se descompone en una parte horizontal (movimiento de la rueda) y una componente vertical (caída de la pipa de dirección). Por tanto, si el lanzamiento de la dirección fuese nulo, el plano de giro de esta sería totalmente paralelo al plano de apoyo de la rueda, de tal manera que la pipa no sufriría ningún movimiento vertical al girar la dirección. De forma opuesta, si el ángulo de lanzamiento fuera de 90° , el plano de giro sería completamente perpendicular al plano de apoyo de la rueda y ninguna parte del giro de la dirección tendría componentes en el plano horizontal, por lo que la rueda no se movería. Estos dos ejemplos pueden comprobarse gráficamente en la figura 2.8.

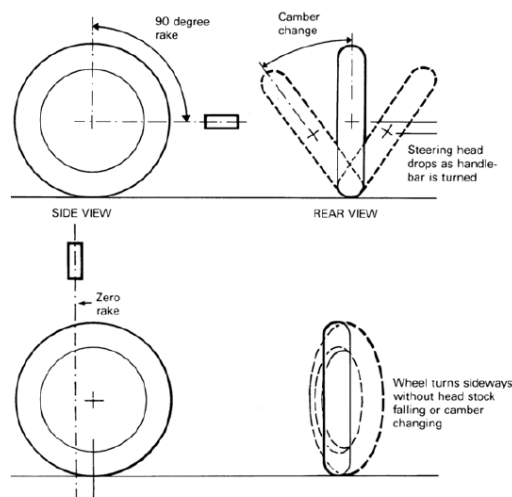


Figura 2.8: Desplazamiento vertical del centro de la rueda debido al giro de la dirección. Comparación entre un lanzamiento nulo y un lanzamiento de 90°

Este efecto es opuesto al efecto autoalineante del lanzamiento, ya que, en la mayoría de casos, para girar de nuevo el manillar a su posición original, se hace necesario aplicar una fuerza hacia arriba sobre la pipa de dirección. Sin embargo, en los casos típicos, esta fuerza es despreciable debido a los pocos mm de desplazamiento vertical que sufre la pipa para un ángulo de lanzamiento estándar.

- Discrepancia entre ángulo de giro de la dirección y ángulo de giro de la huella de contacto:**
 Este efecto tiene lugar por el mismo motivo por el que se produce una caída de la pipa de la dirección, la desalineación entre el plano de giro de la dirección y el de contacto de la rueda con el suelo. Esto provoca que, cuando el piloto gira la dirección un determinado ángulo, se produce una discrepancia entre el ángulo girado por ésta, y el ángulo que, sobre el plano del suelo, gira la huella de contacto de la rueda.

Este efecto se puede comprender, igual que en el caso anterior, imaginando dos motocicletas, una con un ángulo de dirección nulo (plano de giro de la dirección totalmente paralelo al suelo) y otra con un ángulo de giro de 90° (plano de giro de la dirección totalmente perpendicular al suelo). Tal y como se puede ver en la figura 2.9, cuando existe un ángulo de lanzamiento de 90°, el giro del manillar no tiene efecto sobre el giro de la huella de contacto.

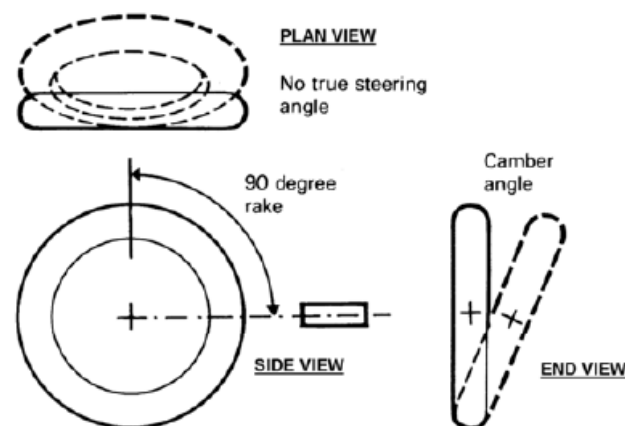


Figura 2.9: Discrepancia entre ángulo de manillar y ángulo de giro de la rueda.

Esto supone que, según el lanzamiento de la dirección, para un mismo giro del manillar, la motocicleta define trayectorias diferentes.

Tal y como se puede ver, el ángulo de dirección tiene diversos efectos sobre el tacto de la dirección, pudiéndola hacer más o menos directa, de forma que, según el tipo de motocicleta referido, se pueden encontrar distintos ángulos de lanzamiento. Sin embargo, no todos los ángulos de lanzamiento presentes en el mercado responden a una cuestión dinámica, en algunos casos la decisión está basada en criterios constructivos o estéticos, como puede ser el caso de las motocicletas de estilo custom.

Tabla 2.2: Comparación entre los ángulos de lanzamiento del eje de dirección de distintas motocicletas.

Motocicleta	Enfoque	Suspensión delantera	Lanzamiento
Honda CBR 600 RR	Deportiva	Convencional	23° 55'
Yamaha GTS	Sport/Turismo	Parker/GTS	24°
BMW K1300S	Sport/turismo	Doulever	29° 36'
Suzuki Burgman	Scooter/ciudadana	Convencional	26° 0'
Honda Goldwin	Turismo	Convencional	29° 15'
Kawasaki er-6n	Naked/ciudadana	Convencional	25° 0'
Honda Shadow	Custom	Convencional	34° 0'

DISTANCIA ENTRE EJES

La distancia entre ejes de una motocicleta es la distancia que separa los centros de ambas ruedas. Sin embargo, algunos autores consideran que la distancia entre ejes debe definirse como la distancia entre puntos de contacto de ambas ruedas. Esto supone que, cuando la dirección se encuentra girada, ambas definiciones arrojan mediciones distintas. Sin embargo, la diferencia no es muy significativa, y los efectos que tiene esta medida sobre el comportamiento final de la motocicleta, continúan siendo válidos para cualquiera de las dos definiciones.

Para un ángulo de dirección dado, la distancia entre ejes es el principal responsable del radio de giro. Por tanto, para el mismo radio de giro, una motocicleta con una mayor distancia entre ejes debe girar la dirección un mayor ángulo. Por este motivo, las motocicletas con una mayor distancia entre ejes tiene una mayor estabilidad direccional y resultan más pesadas a la hora de negociar curvas. Y, por el contrario, las motocicletas con un carácter más ágil, tienen una menor distancia entre ejes.

En la figura 2.10, se muestra este efecto.

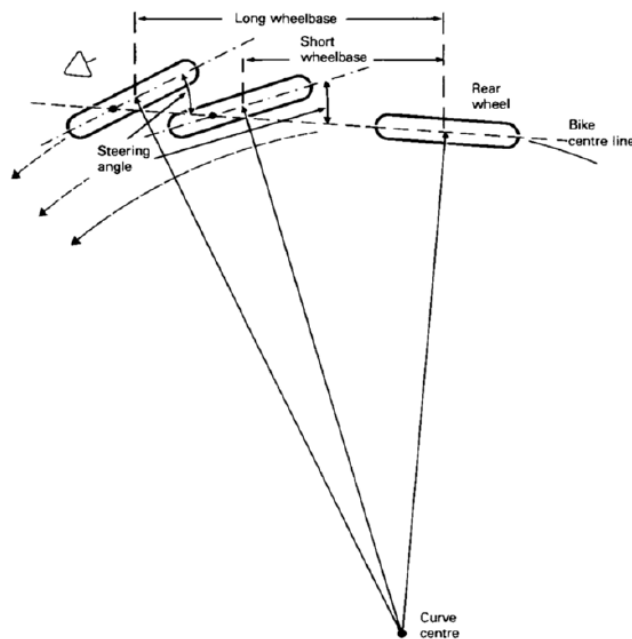


Figura 2.10: Variación del radio de giro de una motocicleta según la distancia entre ejes.

Además de los efectos direccionales, la distancia entre ejes tiene un importante efecto sobre el trabajo de las suspensiones. Por un lado, la distancia entre ejes tiene un gran efecto sobre la transferencia de pesos de un eje al otro durante la frenada y la aceleración, para dos motocicletas con el centro de gravedad a la misma altura, aquella con mayor distancia entre ejes sufrirá una menor transferencia de pesos. Además, en general, una mayor distancia entre ejes supone aumentar los momentos de inercia de guiñada y cabeceo, lo que supone tener una motocicleta más estable y perezosa.

Por otro lado, la distancia entre ejes define la distancia recorrida desde que la motocicleta pisa un bache con la rueda delantera hasta que lo pisa con la rueda trasera. Como ya se ha dicho, las motocicletas componen un sistema altamente acoplado, esto supone que el punto de trabajo una de las dos suspensiones afecta directamente a la otra. A la hora de absorber las irregularidades, se puede encontrar el caso de que, en un firme ondulado, si la distancia entre ejes coincide con la longitud de onda de las ondulaciones del terreno ambas ruedas se encuentran en el mismo punto

del bache, por lo que la motocicleta sufre un continuo vaivén de arriba abajo. Por el contrario, si la longitud del bache es el doble que la distancia entre ejes, cada rueda se encuentra en puntos opuestos del bache, de forma que el cdg apenas sufre movimientos, mientras que la moto completa sufre un continuo movimiento de cabeceo.

Tabla 2.3: Comparación entre la distancia entre ejes de diversas motocicletas.

Motocicleta	Enfoque	Suspensión delantera	Distancia entre ejes
Honda CBR 600 RR	Deportiva	Convencional	1375 mm
Yamaha GTS	Sport/Turismo	Parker/GTS	1495 mm
Kawasaki er-6n	Naked/ciudadana	Convencional	1410 mm
Suzuki Burgman	Scooter/ciudadana	Convencional	1590 mm
Honda Goldwin	Turismo	Convencional	1690 mm
BMW K1300S	Sport/turismo	Doulever	1585 mm
Honda Shadow	Custom	Convencional	1639 mm

En relación con la distancia entre ejes, merece la pena hacer una mención a lo relativo a las motocicletas de suspensión alternativa. Debido a sus sistemas de suspensión, que evitan el hundimiento en las frenadas, pueden permitirse reducir la distancia entre ejes, empeorando la transferencia de pesos, pero mejorando la agilidad del conjunto. La Yamaha GTS es un buen ejemplo de esto., tal y como se puede ver en la tabla 2.3

Es importante recordar que estas relaciones geométricas que se cumplen entre las distintas piezas de una motocicleta no se mantienen constantes a lo largo de su circulación. Esto se debe principalmente a la compresión y extensión de las suspensiones, y al giro del sistema de dirección, pero también al desplazamiento de la huella de contacto al inclinar en las curvas y a otros factores.

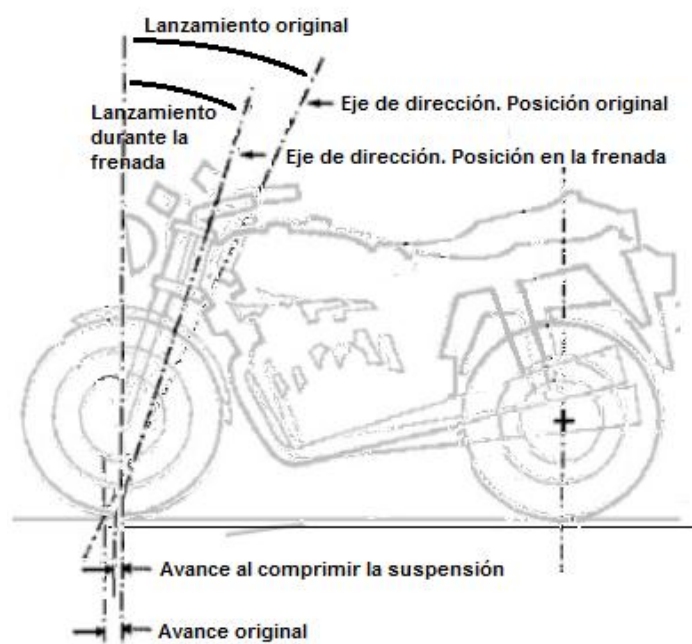


Figura 2.11: Variación de las geometrías de la dirección debidas al hundimiento de la suspensión delantera.

En conclusión, a la hora de diseñar el nuevo sistema de suspensión/dirección, será de vital importancia tener en cuenta todos estos aspectos para lograr una motocicleta con un comportamiento estable, ágil, predecible y cuyas reacciones y sensaciones sean familiares al piloto, de manera que éste se sienta cómodo y seguro desde el primer momento para poder llevarla motocicleta hasta el límite de sus capacidades.

Sin embargo, tal y como se ha visto, los efectos de cada uno de estos parámetros no son fáciles de conocer, e incluso en ciertos aspectos no hay consenso entre todos los autores. Éste es un problema con el que el equipo de diseño se ha encontrado en repetidas ocasiones a la hora de diseñar las suspensiones, y cuya resolución nunca ha sido fácil. Por ello, como se verá más adelante, en muchos casos se ha optado por la vía conservadora y se han impuesto unas cotas similares a aquellas que tienen las suspensiones tradicionales.

2.2.3 Las ruedas

Las ruedas forman los dos únicos puntos de contacto de la motocicleta con el suelo, por ello, factores como el peso, el diámetro y los neumáticos que emplean, son aspectos con una influencia vital sobre el comportamiento de la misma. Sin embargo, excepto el peso del conjunto, las demás características no se encuentran dentro de las posibilidades de diseño de esta motocicleta ya que, tanto el diámetro de las ruedas como el compuesto de los neumáticos, vienen impuestos por el neumático estándar que otorga la organización del campeonato para el que ésta va enfocada. Además, tampoco se ha contado con datos y características del neumático sobre los que fundamentar el diseño de la suspensión.

Por tanto, el único parámetro conocido en el que basarse a la hora de realizar el diseño de la suspensión, ha sido el diámetro de las ruedas. El diámetro de las ruedas es un importante en el comportamiento de una suspensión, según la medida de la rueda, los baches y los agujeros serán mejor o peor absorbidos, ya que para una rueda menor, las irregularidades son más bruscas, lo que hace trabajar más a la suspensión y transmite más vibraciones. Asimismo, como ya se ha mencionado antes, el diámetro de las ruedas tiene un efecto directo en el avance de la dirección, y en la altura de la motocicleta, así como en la variación de los demás parámetros geométricos durante las distintas situaciones que se dan durante el uso de la motocicleta.

2.2.4 Masa suspendida, masa no suspendida y centro de gravedad

Hablando en general, cuanto menos masa tenga una moto, más beneficios se obtendrán. A igualdad de potencia de frenado y de motor, frenará y acelerará antes, además, sufrirá menos fuerzas centrífugas en las curvas, por lo que podrá negociarlas más deprisa. Y, si mantiene la misma distribución de pesos, con un peso menor tendrá menores momentos de inercia en todos sus ejes, lo que supone que será una moto más ágil, con más facilidad a la hora de entrar y salir de las curvas y la posibilidad de hacer los cambios de dirección más rápidamente. También será más sensible a cualquier fuerza que realice el piloto.

Pero no todas las ventajas provienen únicamente de reducir el peso de la motocicleta, también se pueden obtener beneficios o inconvenientes en distintas condiciones según dónde se ubique el centro de masas del conjunto.

Durante los procesos de frenada o aceleración, la transferencia de cargas se puede ver reducida disminuyendo la altura del cdg o reduciendo el peso de la motocicleta. La posición longitudinal del centro de masas no afecta a la transferencia de masas, pero si afecta al reparto de pesos estático, por lo que un cdg muy adelantado o muy retrasado puede provocar que una de las ruedas se levante con excesiva facilidad. Sin embargo, como ocurre con todos los parámetros de la motocicleta, reducir al máximo la transferencia de pesos no es lo más deseable, puesto que esa presión adicional sobre el neumático delantero o trasero mejora sustancialmente la adherencia durante las fases de frenada y aceleración respectivamente. Por tanto, se hace necesario llegar a un compromiso entre un cdg excesivamente bajo que penalice la adherencia y un cdg excesivamente alto que perjudique el funcionamiento de las suspensiones durante las aceleraciones y deceleraciones.

En cuanto a su localización longitudinal, de nuevo se hace necesario llegar a un compromiso entre adherencia trasera y adherencia delantera. Retrasando la posición del centro de masas, se mejora la adherencia del tren trasero y, por tanto la capacidad de aceleración de la motocicleta, mientras que, adelantándolo se mejora la estabilidad direccional y la agilidad de la motocicleta.

La localización del centro de gravedad de la motocicleta, también afecta a los momentos de inercia de la motocicleta. En todos ellos es igualmente interesante alcanzar un compromiso entre momentos de inercia reducidos que favorezcan un comportamiento ágil de la máquina y momentos de inercia mayores que puedan favorecer la estabilidad. Para reducir el momento de inercia de cabeceo y quiñada es importante agrupar las masas lo más cerca posible del centro de la motocicleta. Mientras que, para disminuir el momento de inercia de inclinación, que permita tumbar más rápidamente la moto, es necesario disminuir la altura del cdg.

Sin embargo, no todos los aspectos concernientes a la masa de la motocicleta se limitan a su peso total y a la localización de su centro de gravedad. Para lograr un buen comportamiento de las suspensiones, los valores de la masa suspendida y no suspendida, especialmente este último, son críticos.

Las definiciones de masa suspendida y no suspendida son, aparentemente, conceptos sencillos, aunque en multitud de ocasiones suponen una fuente de confusiones. Teóricamente, la masa no suspendida es la suma de las masas del elemento que está directamente apoyado sobre el suelo (rueda) junto con todas las masas de aquellas piezas que se unen rígidamente a él (discos de freno, pinzas de freno, sistema de ABS...). Mientras que la masa suspendida es aquella que apoya sobre las suspensiones (chasis, motor, piloto...). El principal problema surge cuando se intenta clasificar a las suspensiones (muelles, amortiguador, basculante...), ya que éstas tienen partes rígidamente unidas a la masa suspendida y partes rígidamente unidas a la masa no suspendida. En el caso de los muelles, se suele suponer que la masa que se debe añadir tanto a la masa suspendida como a la no suspendida oscila entre $1/6$ y $1/3$ del peso total de los mismos. En cualquier caso, debido a su bajo

peso en relación con el total de la motocicleta, esta cantidad no supone un factor decisivo.

Sin embargo, éste no es el único problema que surge a la hora de definir la masa suspendida y no suspendida de una motocicleta. A la hora de plantear el funcionamiento de cada una de las dos suspensiones por separado aparece otra cuestión, ¿Cuánta proporción del peso del conjunto de chasis, motor etc. debe ser añadido a cada una de las suspensiones? A menudo se resuelve aplicando la misma proporción que la distribución de pesos estática, aunque esto arroja varios problemas. El principal de esos problemas tiene que ver con la enorme transferencia de pesos que tiene lugar durante las frenadas y aceleraciones que, en algunos casos, pueden llevar a que la rueda trasera o delantera se levanten del suelo tal y como se puede ver en las figuras 2.12 y 2.13. Esto supone que la suspensión correspondiente tenga una masa suspendida igual al peso de la moto completa menos la masa no suspendida relativa a ese tren. Por ello, a la hora de calcular el funcionamiento de una suspensión, es importante tener en cuenta el peso que está soportando en esa situación en particular.



Figura 2.12: Motocicletas de competición apoyadas únicamente en su rueda trasera debido a la transferencia de peso durante la fase de aceleración.



Figura 2.13: Motocicleta de competición apoyada únicamente en su rueda delantera debido a la transferencia de peso durante la fase de frenada.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la masa no suspendida de la motocicleta es un parámetro que afecta de manera importante al funcionamiento de las suspensiones. En particular, el objetivo cuando se trata de buscar adherencia es lograr una masa no suspendida lo menor posible.

Como ya se ha explicado, el principal objetivo de la suspensión de una motocicleta de competición es lograr que en la interfase rueda-suelo haya la mayor cantidad posible fuerza de contacto entre ambos. En definitiva, esto supone que la suspensión debe encargarse de que la rueda se desplace por el suelo siguiendo de la manera más fiel posible el perfil de rugosidades que éste presente. Por ello, es interesante reducir al máximo la masa no suspendida, con el objetivo de evitar inercias que dificulten dicha tarea. Esto es fácilmente comprensible acudiendo de nuevo al esquema de motocicleta de la figura 2.3 e imaginando por un momento que esa motocicleta esquemática se desplaza por una serie de baches, de modo que, cuanto menor sea la masa no suspendida, más pegados al asfalto se mantendrán los neumáticos.

En cuanto al sistema de dirección, es importante resaltar la importancia del momento de inercia alrededor del eje de dirección. Un sistema de dirección con un gran momento de inercia supondrá una dirección pesada, que hará la motocicleta más estable y menos ágil. Además, contribuirá a mitigar las vibraciones que llegan desde la rueda, limitando la información que llega hasta las manos del piloto.

2.2.5 Esfuerzos sobre la suspensión

Para poder comprender totalmente el planteamiento de partida de la suspensión delantera y las decisiones posteriores que se tomaron a la hora de completar el diseño, es importante hacer un repaso de las sollicitaciones mecánicas a las que se encuentra sometida una suspensión delantera:

IRREGULARIDADES EN RECTA



Figura 2.14: Esquema de fuerzas en la suspensión delantera al circular sobre una irregularidad.

Como se puede observar en la figura 2.14, cuando una motocicleta se encuentra con un bache, se produce un esfuerzo local en el punto de contacto entre el bache y el neumático. Este esfuerzo siempre irá dirigido hacia el centro de la rueda, por lo que la dirección de la fuerza dependerá de la altura del bache y del diámetro de la rueda. Es comprensible, por tanto, que esta fuerza no siempre estará alineada con la dirección de compresión de la suspensión, y por tanto habrá una componente de la primera que será absorbida por el chasis.

FRENADA



Figura 2.15: Frenada en una motocicleta de competición.

Para frenar un cuerpo en movimiento, es necesario realizar sobre él una fuerza en la misma dirección y sentido opuesto a la velocidad. En el caso de una motocicleta, esto supone realizar una fuerza dirigida hacia la parte trasera de la moto. Debido a que el único punto de contacto con el suelo está en las ruedas, esta fuerza tiene su punto de aplicación en la huella del neumático.

Para comprobar el efecto que estas fuerzas de frenado tienen sobre la suspensión delantera, es preciso trasladarlas al anclaje de la misma. Al hacerlo, se puede comprobar que ésta se transforma en una fuerza horizontal y un momento en sentido horario.



Figura 2.16: Esquema de fuerzas en la rueda delantera durante una frenada en una motocicleta.

Tal y como ocurre en el caso de una irregularidad en el pavimento, la fuerza resultante, en la mayoría de casos de la frenada, no estará alineada con la dirección de funcionamiento de la suspensión, por tanto las demás componentes (incluido el momento resultante) serán asimiladas por el chasis.

IRREGULARIDADES EN CURVA

La absorción de las irregularidades del pavimento durante la circulación en curva es uno de los aspectos más complejos de la dinámica de una motocicleta. En el caso de las motocicletas de competición, el paso por curva es el punto más crítico a la hora de conseguir buenos resultados, por ello, es el punto donde se necesita la máxima cantidad de adherencia posible. Uno de los principales encargados de conseguir esta adherencia es el sistema de suspensión. Pero debido a los grandes ángulos de inclinación que se pueden alcanzar en las motocicletas modernas, cuando éstas negocian una curva, la dirección de trabajo de la suspensión se encuentra muy desalineada con la dirección de las perturbaciones que sufre el neumático. Por ello es necesario diseñar un chasis que sea capaz de lidiar con estas situaciones.

Cuando se alcanza un bache con la motocicleta inclinada, la fuerza del bache es prácticamente vertical, de manera que sólo una componente de esta fuerza actúa en línea con la suspensión, mientras que la otra, actuará en dirección perpendicular a la motocicleta. La relación entre estas componentes depende del ángulo de inclinación de la motocicleta.

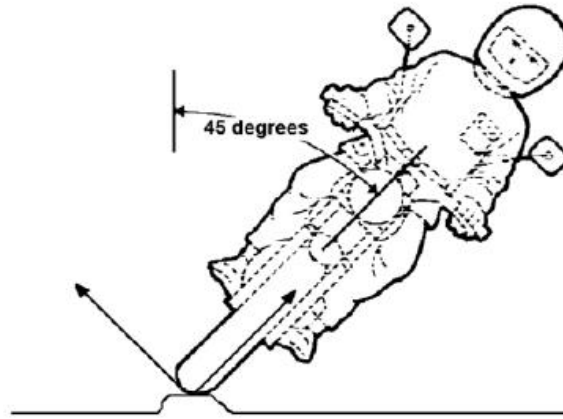


Figura 2.17: Componentes de la fuerza que un bache provoca sobre una motocicleta inclinada.

Esto supone que, cuando una motocicleta inclinada se encuentra con un bache, parte del mismo es absorbido por la suspensión, y otra parte es absorbida por el resto de la motocicleta, tal y como se puede ver en las figuras 2.18 y 2.19.

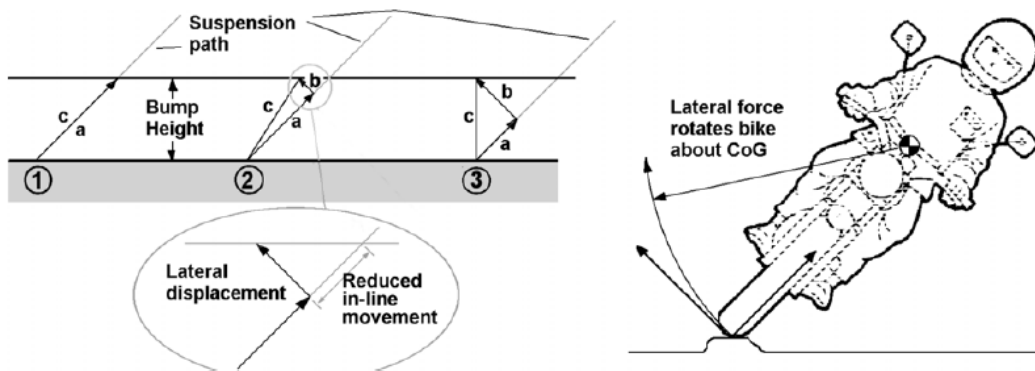


Figura 2.18: Posibles trayectorias de la suspensión frente a la absorción de un bache.

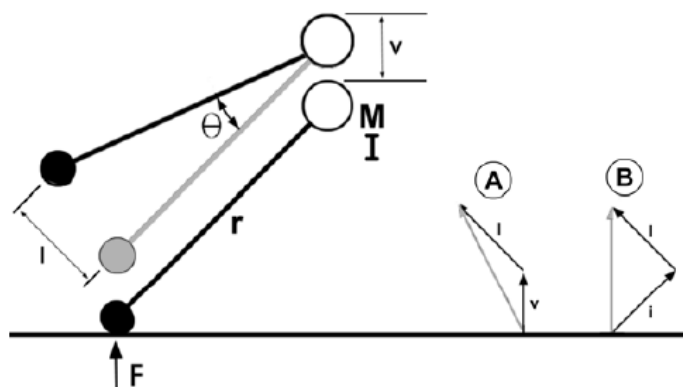


Figura 2.19: Absorción de un bache idealizando la moto como un sólido rígido.

Si se idealiza la motocicleta como un péndulo infinitamente rígido, la componente del bache que

no es absorbida por la suspensión, se transforma en un movimiento de la motocicleta con una componente vertical y una componente de rotación. Como es obvio, una serie de sacudidas verticales unidas a una serie de rotaciones de la motocicleta no componen el escenario más deseable para mantener una buena adherencia en los neumáticos.

De esta manera, introducir una pequeña capacidad deflexión lateral en la suspensión se perfila como una buena manera de evitar sacudidas verticales de la motocicleta. Es importante notar que la solución al problema no pasa por introducir más capacidad de desplazamiento lateral, si no en proporcionar un mayor amortiguamiento lateral.

Mediciones prácticas demuestran que el chasis de una motocicleta tiene una cierta histéresis^[x], de esta manera, introducir cierto grado de flexibilidad lateral en el chasis también introduce un cierto grado de amortiguamiento, y el efecto global será beneficioso siempre que la rigidez sea suficiente para no provocar problemas de estabilidad. Visto desde la perspectiva opuesta, aumentar la rigidez del chasis más allá del valor necesario para evitar inestabilidades, supondrá perder amortiguación lateral y será contraproducente.

Es importante notar que, cuando se habla de introducir amortiguación lateral en el chasis, no se habla del chasis propiamente dicho si no del conjunto de la motocicleta completa. Esto supone que resulta indiferente de donde provenga la amortiguación lateral siempre y cuando logre que los neumáticos trabajen correctamente mientras ésta se encuentra inclinada. De tal manera que es posible construir un chasis lo más rígido posible y tratar de introducir una flexión controlada en la suspensión, o incluso en el buje de la llanta como han sugerido algunos autores^[x]. Igualmente también sería posible tratar de diseñar unas suspensiones lo más rígidas posibles e intentar introducir amortiguamiento lateral usando un chasis menos rígido.

En resumen, cuando se circula sobre un bache con la moto inclinada, el amortiguador experimenta un movimiento considerablemente menor del que tendría con la motocicleta vertical. Para lograr una mejora en la adherencia en curva, es necesario llevar a cabo una serie de operaciones que maximicen el desplazamiento de la suspensión. Entre todas las posibles formas de lograr esto, a la hora de diseñar la suspensión nos hemos centrado en las dos siguientes:

- **Reducir la masa no suspendida:** para reducir lo posible las inercias del movimiento de la suspensión.
- **Disminuir la altura del cdg:** para evitar los movimientos de rotación de la moto inclinada al superar un bache.

Además, tal y como se ha explicado, el amortiguamiento total también se mejora al introducir amortiguamiento lateral. Este será el tercer parámetro en el que se ha hecho hincapié a la hora de diseñar la suspensión.

Todos estos esfuerzos sobre las suspensiones de las motocicletas son de vital importancia a la hora de diseñar una suspensión alternativa, ya que determinan el buen funcionamiento del mismo. Por ello es de gran importancia no perderlos de vista a la hora de plantear una proposición alternativa

a las suspensiones actuales.

2.2.6 Consideraciones de rigidez del chasis

En este punto, ya se han explicado las condiciones bajo las que funciona una motocicleta y los principales requerimientos que su funcionamiento impone sobre las suspensiones. Por ello, es recomendable hacer un repaso de las principales consideraciones que hay que tener a la hora de calcular la rigidez de la motocicleta.

El principal requisito es que el chasis sea lo suficientemente rígido como para mantener la geometría que se ha elegido para la moto. En una motocicleta existen muchas fuentes de flexión, y es importante minimizarlas, para lograr que las flexiones que se produzcan estén controladas por el diseñador.

Es especialmente importante lograr que los planos medios de ambas ruedas se mantengan perfectamente alineados para lograr una buena estabilidad direccional. Pero al mismo tiempo es necesario lograr una amortiguación lateral satisfactoria, de manera que la adherencia sea buena cuando la motocicleta está inclinada. Por ello, el principal requisito es lograr un conjunto con una cierta flexibilidad lateral a fin de lograr la citada amortiguación lateral, pero con una capacidad de torsión lo más reducida posible para evitar la desalineación de los planos de las ruedas.

Tal y como se comprobó en el proyecto Demonstener, una motocicleta puede circular sin problemas con una baja rigidez. Sin embargo, esta rigidez “extra” es necesaria para que los pilotos tengan confianza en el comportamiento de la motocicleta. Esta consideración ha sido de vital importancia a lo largo de todo el diseño de la columna de dirección de LaMoto2.

3. Reseña histórica y estado del arte

En 1885, solo 9 años después de que Otto inventase su motor de combustión interna, Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler acoplaron uno de esos motores a una bicicleta realizada en madera y con dos ruedas adicionales a los lados que ayudaran a mantener el equilibrio. Nació así la *Reitwagen*, que es considerada por muchos como la primera motocicleta de la historia.



Figura 3.1: Motocicleta Reitwagen

En 1894, los hermanos Heinrich y Wilhelm Hildebrand se asociaron con Alois Wolfmüller para diseñar, de nuevo partiendo de una bicicleta, la primera motocicleta producida en serie. Conocida como Hildebrand & Wolfmüller, aún no equipaba ningún sistema de suspensión. Su única concesión al confort eran una serie de muelles bajo el asiento del piloto.



Figura 3.2: Motocicleta Hildebrand & Wolfmüller

Partiendo del modelo de bicicleta, las primeras suspensiones comenzaron a usarse en el tren delantero, principalmente, en busca del confort del piloto. Estos sistemas pueden dividirse en dos categorías principales, aquellos cuyo mecanismo de dirección está formado por un eje que

atraviesa el chasis (directamente derivados del modelo tradicional de la bicicleta) y aquellos cuyo mecanismo de dirección está localizado en otra parte de la motocicleta.

3.1. EJE DE DIRECCIÓN EN EL CHASIS (PIPA DE DIRECCIÓN)

Uno de estos primeros sistemas fue la horquilla “Girder” que, tal y como se puede ver en la figura 3.3, está compuesta por un soporte que pivota alrededor del eje de la dirección (1), una horquilla que abraza la rueda (2) y un conjunto de brazos oscilantes que permiten un movimiento relativo entre la rueda y el chasis, cuya energía es absorbida por un conjunto muelle-amortiguador.

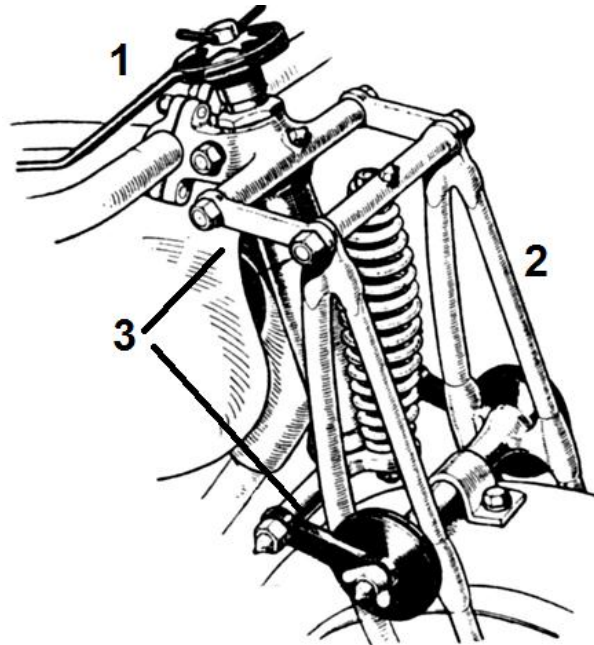


Figura 3.3: Esquema de suspensión Girder

Estas horquillas recurrían a la amortiguación por fricción lo que, desafortunadamente, otorga unas propiedades opuestas a las necesarias, ya que conforman una suspensión muy dura al inicio del movimiento (fricción estática) y muy blanda una vez éste ha comenzado (fricción dinámica). Además, también presentaba un problema estructural, y es que su rigidez lateral era bastante pobre.

En 1935, BMW popularizó la conocida horquilla telescópica, que incluía amortiguación hidráulica y proporcionaba una apariencia más limpia y una menor necesidad de mantenimiento.

Este sistema de suspensión consiste en dos barras telescópicas colocadas a cada uno de los lados de la rueda, y en cuyo interior se encuentra el sistema de amortiguación. Las barras se unen entre sí por la parte superior mediante dos tijas sobre las que va montado el eje de la dirección, que es el único punto de anclaje al chasis. Mientras que, en la parte inferior, se encuentra un eje que también une ambas barras y que sirve de soporte para la rueda.

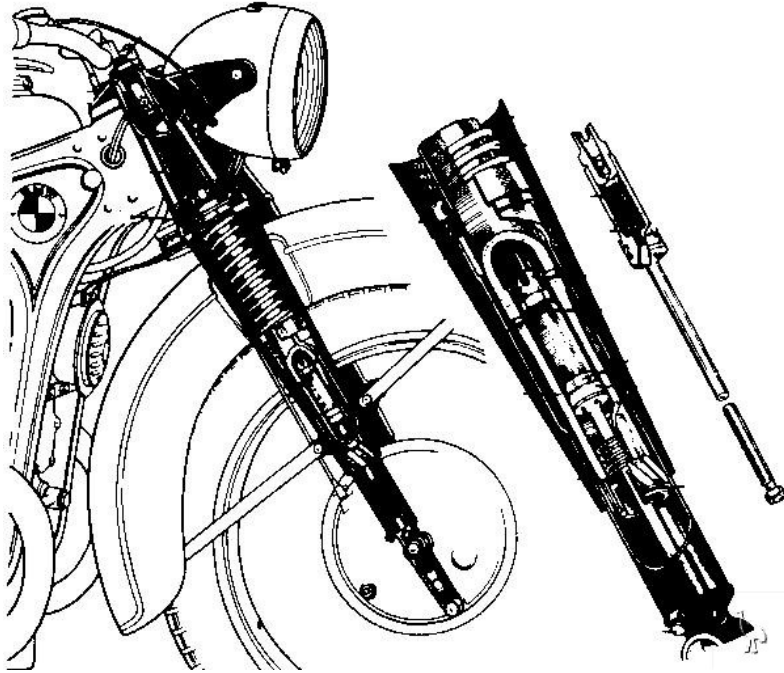


Figura 3.4: Esquema del primer sistema de suspensión por horquillas diseñado por BMW

Sin embargo, en aquellos años, la horquilla tenía una menor rigidez lateral y torsional que la horquilla Girder. Por ello, en busca de unas mejores características dinámicas una de las alternativas a estos sistemas era la suspensión por rueda empujada. En este sistema, la rueda pivota alrededor de un punto del chasis, y la amortiguación se realiza mediante un conjunto similar al usado en la suspensión trasera.

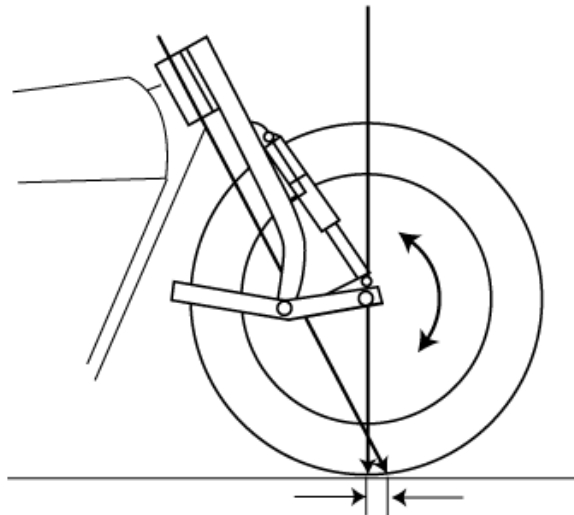


Figura 3.5: Esquema del funcionamiento del sistema de suspensión por rueda empujada.

Cuando el fabricante buscaba la calidad por encima de un bajo coste o un aspecto limpio, normalmente se decantaban por este sistema, que proporcionaba una mayor rigidez lateral y torsional, una menor masa no suspendida y un mejor amortiguamiento.

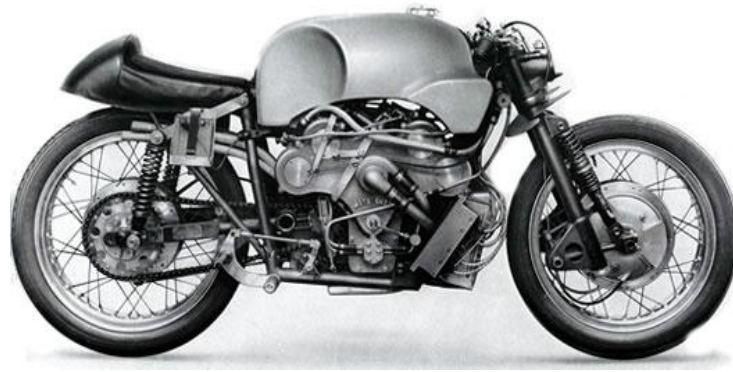


Figura 3.6: Moto Guzzi V8 equipada con suspensión por rueda empujada.

Uno de los principales problemas que tienen estas suspensiones es su desplazamiento circular que, en las posiciones extremas, altera en gran medida la geometría de la motocicleta, además de su corto recorrido, lo que las hace inviables en motocicletas que requieran un gran recorrido de suspensión.

A pesar de sus problemas iniciales, a partir de los años 50 la horquilla telescópica comenzó a dominar el mercado de forma abrumadora, situación que perdura hasta nuestros días hasta nuestros días, en los que, aparentemente no existe apenas alternativa para otros sistemas, más allá de pequeños experimentos puntuales y preparaciones “vintage”.

A día de hoy, las horquillas más avanzadas son las conocidas como horquillas invertidas. En ellas, la botella se coloca en la parte superior, en busca de un anclaje al chasis de mayor diámetro que aporte una mayor rigidez.



Figura 3.7: Horquilla invertida moderna.

Dentro de las horquillas invertidas, el sistema más moderno es el conocido como “Big Piston Fork”, cuya estructura interna sigue los mismos principios que cualquier otro sistema pero simplificando mucho el funcionamiento respecto a sus rivales.

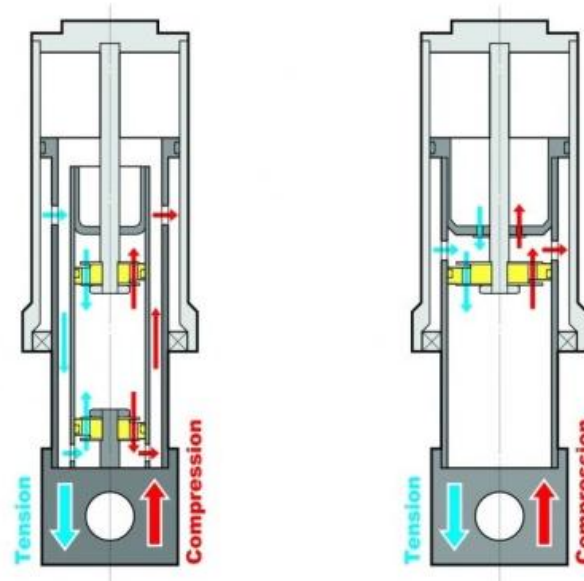


Figura 3.8: Comparación del sistema interno de dos amortiguadores. A la izquierda el sistema tradicional, a la derecha el sistema "Big Piston Fork".

Sin embargo, parece no haber una razón concreta para este dominio más allá de la mera tradición: en el campo de las motocicletas comerciales, el usuario suele ser reacio a los cambios, por lo que los departamentos de marketing prefieren no arriesgar; mientras, en el campo de la competición, los pilotos pasan toda su carrera usando motocicletas equipadas con horquillas tradicionales, educando a su cerebro a un determinado comportamiento de la motocicleta, lo que provoca que no sepan entender bien las reacciones y sensaciones que se producen en motocicletas con otro tipo de suspensiones, y en consecuencia no sean capaces de llevarlas al límite de sus capacidades.

3.2. LAS INICIATIVAS DE BMW

En el campo de las motocicletas, BMW siempre ha remado contracorriente, fue la primera en desmarcarse de su competencia usando horquillas telescópicas, y ahora que las horquillas mandan sobre el resto de suspensiones delanteras, sus ingenieros siguen buscando otro tipo de soluciones.

Uno de sus sistemas más conocidos es el Telelever. Este sistema es similar al Saxon/Motad de 1980 que consiste en unas horquillas telescópicas que únicamente guían la rueda, y un brazo oscilante con forma de "A" sobre el que apoya un conjunto de muelle y amortiguador. La dirección está formada por un eje sobre el chasis y otra apoyada sobre la punta del brazo oscilante. La línea definida entre el eje y la rótula conforma el eje de dirección. Para absorber el pivotamiento de las barras telescópicas con respecto al chasis, éstas se anclan a la tija mediante unas rótulas.



Figura 3.9: Sistema Telelever de BMW

Este sistema es conocido por su confort y sus excelentes propiedades anti hundimiento. No obstante, parece que no es capaz de generar la suficiente confianza en los pilotos como para forzar la motocicleta hasta el límite de sus capacidades.

Otro de los sistemas de la empresa alemana, parte de aquel Diseñado por Norman Hossack en 1980. En el diseño original, su apariencia es similar al sistema Girder, con una larga horquilla rígida que soporta la rueda y dos brazos que unen la parte superior de la horquilla con el chasis y permiten un movimiento relativo entre ambos. Pero en este caso la suspensión y los brazos oscilantes no se mueven con la dirección. Es únicamente la horquilla la que gira alrededor de dos rótulas que, de manera similar al Telelever, van montadas sobre la punta de los brazos oscilantes.

En el proyecto MotoStudent MS1, que se llevó a cabo en esta misma universidad, se usó un sistema Hossack para la suspensión delantera.

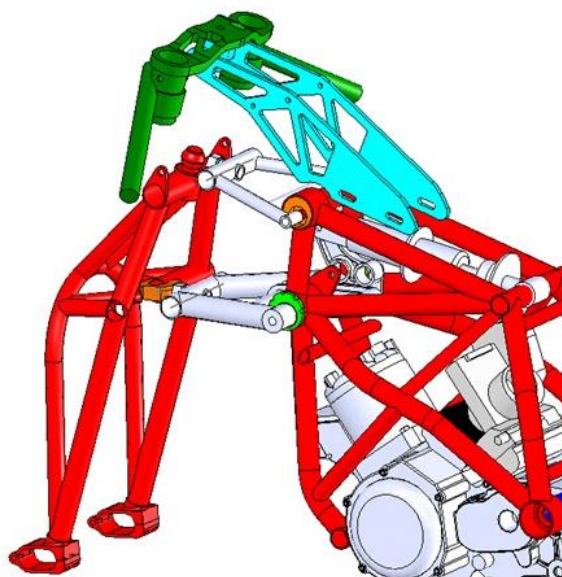


Figura 3.10: Esquema del sistema de suspensión Hossack usado en la MotoStudent MS1 diseñada en la UC3M.

Este sistema ha sido rediseñado por BMW y es comercializado bajo el nombre Doulever en los modelos más altos de gama desde el año 2004.



Figura 3.11: Sistema Doulever de BMW.

3.3. HUB-CENTRE STEERING

Además de los dos sistemas comercializados por BMW existe un tercer planteamiento a la hora de localizar el mecanismo de la dirección, que bien podría formar varios grupos a parte debido a la cantidad de alternativas que ofrece. Se trata de aquellos sistemas que localizan el mecanismo de la dirección en el buje de la rueda.

La primera propuesta histórica de este tipo, se encuentra en la Ner-a-Car, diseñada en 1918, que montaba un basculante delantero en forma de U con el extremo cerrado hacia delante. El basculante atravesaba la rueda, y era en el centro del eje donde se encontraba el sistema de dirección. En su día, esta motocicleta fue reconocida por su gran estabilidad.



Figura 3.12: Motocicleta Ner-a-Car de 1918



Figura 3.13: Detalle del buje delantero de la Ner-a-Car

El principal inconveniente de este diseño es que el eje de dirección es solidario al basculante, de tal manera que el ángulo de lanzamiento varía según la posición del basculante. En la Ner-a-Car el recorrido de la suspensión era muy reducido, pero en una motocicleta moderna, este problema resultaría inaceptable.

Posteriormente, Jack Difazio planteó un buje que incluía la dirección (figuras 3.14 a 3.16) y que solucionaba el problema de alteración en el lanzamiento que planteaba la Ner-a-Car. En este diseño, el eje de la rueda tiene alojado en su interior el eje de dirección, que está soportado por un basculante mediante casquillos, pero no está fijado a él, de manera que puede rotar con respecto al resto de la suspensión.



Figura 3.14: Montaje del eje de dirección de un buje tipo Difazio



Figura 3.15: Eje de dirección usado en un sistema con buje tipo Difazio



Figura 3.16: Pivotamiento del eje de dirección en un buje tipo Difazio

Además, el buje va unido a unos tirantes en forma de A, que son los encargados de mantener en su posición el eje de giro, evitando una rotación descontrolada. Estos tirantes también se encargan de la dirección y de soportar los pares de fuerzas generador por el sistema de frenos. Según la geometría de la suspensión, la evolución del ángulo de lanzamiento en función del recorrido de la suspensión variará de una forma u otra. En la figura 3.17, se presenta una Suzuki 500c.c. de carreras equipada con el sistema de dirección diseñado por Jack Difazio.



Figura 3.17: Suzuki 500 equipada con el sistema original diseñado por Jack Difazio

En la actualidad, la motocicleta más famosa equipada con un sistema de dirección integrado en el buje es la Bimota Tesi. El proyecto lleva desarrollándose desde antes de 1983, cuando apareció el primer prototipo. Desde entonces los cambios en busca de un mejor compromiso han sido muy numerosos.



Figura 3.18: Bimota Tesi 3D



Figura 3.19: Detalle del sistema de suspensión/dirección de la Bimota TESI

En este diseño, el eje de dirección también puede rotar en su alojamiento del buje. Esta rotación se elimina introduciendo un tirante anclado al chasis, que también ayuda a soportar los esfuerzos de torsión que inducen las pinzas de freno. En este caso, la dirección se traslada desde el manillar hasta la rueda mediante una serie de reenvíos a lo largo del chasis (tirante inferior en la figura 3.19).

Uno de los puntos flacos de la Bimota es precisamente su sistema de dirección. Al no ser un mecanismo directo, es fuente de diversos problemas como el “Bump Steer”, la falta de sensibilidad en el tacto de la dirección o la falta de progresividad. Los problemas de la dirección de esta motocicleta han sido uno de los principales problemas a evitar a lo largo del proyecto de LaMoto2, más adelante se verá cómo se han intentado subsanar.

3.4. PROYECTO ELF

Bajo este nombre se conoce una serie de motocicletas diseñadas por Andrea de Cortanze, patrocinadas por la empresa francesa ELF y Honda. El denominador común de todas estas motocicletas era su radical concepción, entre otras características, usaban el motor como elemento estructural y equipaban una suspensión delantera alternativa heredada del concepto usado en los coches (de Cortanze había trabajado para Alpine-Renault).

En 1979 se presentó el prototipo conocido como Elf-X, que usaba un basculante monobrazo trasero, carecía de chasis, y usaba un sistema de doble brazo superpuesto en la suspensión delantera. En este caso, al igual que en los coches, el mecanismo de dirección se encontraba en el brazo vertical de la suspensión, por lo que no se trataba de un sistema de dirección en el buje propiamente dicho, aunque estaba emplazado realmente cerca.

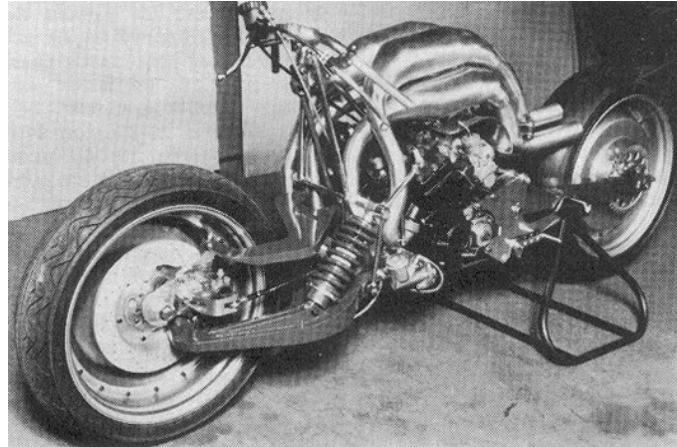


Figura 3.20: Prototipo original de la Elf-X

En 1980 se presentó la Elf-E, que equipaba un motor de origen Honda (la Elf-X montaba un motor Yamaha). Desafortunadamente, el hecho de usar el motor como elemento estructural provocó muchas roturas en el mismo. El sistema de dirección no cambió demasiado con respecto al prototipo, y mantenía el mismo accionamiento indirecto de la suspensión y los dos brazos oscilantes. La intención de Cortanze era “bajar el centro de gravedad, lograr una suspensión anti hundimiento ‘natural’, reducir el peso y eliminar completamente el chasis”.



Figura 3.21: Elf-E

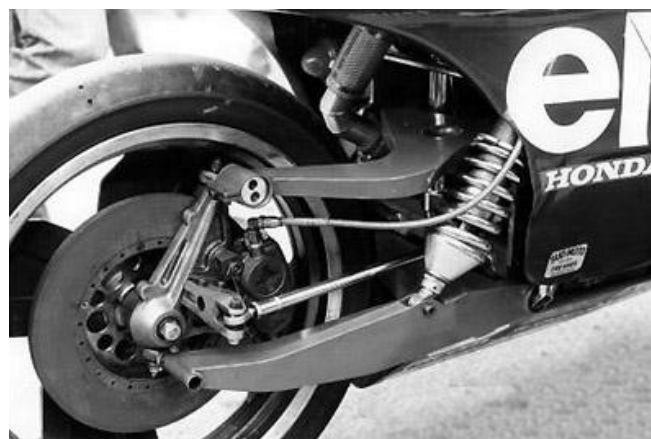


Figura 3.22: Detalle de la suspensión delantera de la Elf-E

Después de la Elf-E, llegó la Elf-2, pero no fue hasta la Elf-3 cuando cambiaron la concepción del sistema de suspensión-dirección delantera para usar un sistema similar al McPherson utilizado en los automóviles.



Figura 3.23: Elf-3

Uno de los principales problemas que arrastró la Elf a lo largo de toda su historia se debía a su basculante monobrazo delantero. El uso de este tipo de anclaje de suspensión hacía imposible el uso de un doble disco delantero, lo que suponía perder eficacia de frenado.

3.5. DEMONSTENER D1200R

La Demonstener D1200R supone una de las alternativas a la suspensión tradicional más recientemente planteadas.

Su concepto recoge el testigo de varias motocicletas alternativas anteriores. Por un lado hereda el doble brazo de las primeras Elf combinándolo con un sistema de dirección similar al utilizado en las últimas creaciones del mismo equipo. Mientras que su sistema de amortiguación recuerda al empleado en el sistema Telelever de BMW.



Figura 3.24: Demonstener D1200R

Sin embargo, al igual que ocurría con el concepto de suspensión de la Elf, la Demonstener tiene un problema con el sistema de frenado inherente a la concepción de su suspensión. Debido a que las basculantes solamente se anclan a la rueda por un lado, únicamente puede equiparse con un disco de freno, lo que le resta potencia al sistema de frenado. Sin embargo, esta desventaja se ha podido solventar gracias al uso de un disco perimetral.

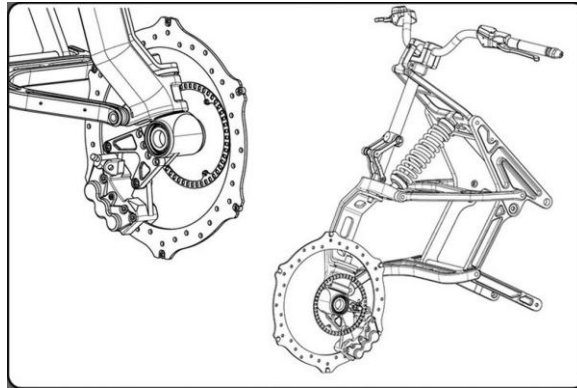


Figura 3.25: Esquema del sistema de suspensión y dirección delantera de la Demonstener D1200R

Según varios de los pilotos que probaron este prototipo, la motocicleta adolecía de falta de sensaciones en el tren delantero. Probablemente este problema provenía de la falta de rigidez del tren delantero, una falta de rigidez que, sin embargo, le permitía circular perfectamente.

4. La suspensión delantera

En una motocicleta es imposible concebir el sistema de dirección sin el de suspensión y viceversa. Por ello, a pesar de no ser el objeto de este documento, en este capítulo se hace un breve resumen de la concepción funcionamiento y diseño final del sistema de suspensión delantera. Además, aunque en el proyecto se presentan por separado, ambos sistemas fueron desarrollados de manera simultánea por el mismo equipo de diseño.

En este punto, es importante destacar que en el diseño de una suspensión/dirección de motocicleta existen cinco parámetros básicos de actuación:

- Muelle
- Amortiguador
- Características del neumático
- Relación entre masas suspendidas y masas no suspendidas
- Geometrías de la suspensión

De estos cinco parámetros de diseño de la suspensión, tres de ellos fueron acotados desde un principio, por lo que, finalmente, solo fueron dos las características variadas durante el diseño.

En cuanto al neumático, no había posibilidad de elección, ya que la organización del CEV provee de neumáticos a los competidores. Mientras que, para el diseño del muelle amortiguador; se decidió elegir un conjunto comercial. Por ello, que los requerimientos de funcionamiento de estos componentes se perfilaron como uno más de los puntos de partida impuestos al diseño de la suspensión.

4.1. PROBLEMAS DE LAS SUSPENSIONES TRADICIONALES

Previamente a plantear el diseño del sistema de suspensión, se hace un breve repaso de los problemas tradicionales que la suspensión delantera ha arrastrado a pesar de su gran éxito comercial.

- **Flexibilidad:** Uno de los problemas básicos que tienen que vencer las horquillas es su flexibilidad. Este problema radica en su concepción: al tratarse de elementos tan esbeltos, resulta muy complicado rigidizarlos. Sin embargo, como ya se ha comentado, la flexibilidad solo resulta favorable cuando se trata de flexibilidad lateral. Pero, por su diseño, las horquillas tienen flexibilidad en todas direcciones, lo que perjudica al comportamiento de la motocicleta.

Simplificando el conjunto, se puede decir que las horquillas y el chasis forman una viga empotrada, de lo que se deduce que los máximos esfuerzos tienen lugar en las tijas. En busca de mejorar la rigidez en éste punto, surgieron las horquillas invertidas, que se anclan al chasis por su zona más gruesa (figura 4.1)



Figura 4.1: Suspensión delantera con horquillas invertidas.

- **Rigidez y pares de fuerza en su anclaje al chasis:** Otro de los principales retos a los que se tiene que enfrentar la suspensión por horquillas, tiene también su raíz en la concepción básica del sistema. Debido a su gran longitud y a su esquema de viga en voladizo, las cargas que sobre ellas aparecen (ver apartado de cargas sufridas por la suspensión) producen unos enormes esfuerzos sobre el anclaje en el chasis. Esto hace necesario sobredimensionar el chasis en su parte superior, aumentando el peso del conjunto y de la masa suspendida, y subiendo el centro de gravedad de la motocicleta.

En las figuras XX y XX, aparece una comparativa entre dos motocicletas, una con horquilla tradicional, y otra con una suspensión delantera mediante basculante. En esas fotos se puede apreciar cómo, en la zona de la dirección, la motocicleta con horquilla tiene un chasis mucho más voluminoso, mientras que la motocicleta con suspensión alternativa es mucho más ligera en esa zona, puesto que únicamente tiene que soportar los esfuerzos que el piloto ejerce.



Figura 4.2: Chasis Ducati 1198 Panigale. En la imagen se aprecia la masiva pipa de dirección diseñada para soportar todos los esfuerzos transmitidos desde la suspensión.



Figura 4.3: Vyrus 984. En la imagen se puede observar la ligereza del chasis en la zona de la pipa de dirección.

- **Movimiento independiente de las barras:** Relativo también a la rigidez del conjunto, se encuentra uno de los principales problemas de las horquillas, y más concretamente de las horquillas invertidas. Cada una de las dos botellas del conjunto de la suspensión puede moverse de manera independiente.

Con el uso de horquillas tradicionales, este problema se puede resolver con un puente que una ambas botellas, pero en el caso de las horquillas invertidas, éste puente chocaría con la rueda.



Figura 4.4: Detalle de una horquilla convencional con las dos botellas unidas mediante un arco.

Para contrarrestar este problema, las horquillas invertidas tienen que recurrir a ejes de rueda cada vez mayores y más rígidos. Lo que supone añadir un mayor peso a la masa no suspendida.



Figura 4.5: Detalle de una horquilla invertida con un eje de gran diámetro rigidizando el conjunto.

- **Hundimiento en la frenada:** Otro de los problemas de las horquillas, ya mencionado anteriormente, es el gran hundimiento al que están sometidas en la frenada. Esto supone que, durante esa fase, gestionan los baches de manera menos eficaz puesto que tienen un menor recorrido y corren el riesgo de colapsar, y además, debido a los muelles progresivos, en ese punto funcionan como suspensiones más duras.
- **Cargas de flexión:** Como se ha explicado en el apartado de fuerzas sufridas por la suspensión, debido al ángulo de lanzamiento que presentan la mayoría de las horquillas usadas actualmente, en casi todas las situaciones posibles se producen fuerzas perpendiculares a la dirección de trabajo de la horquilla. Esto supone que siempre existan unos rozamientos entre los distintos componentes que endurecen la respuesta de la suspensión, especialmente frente a pequeños baches.
- **Problemas con el ram-air:** Con la proliferación de las admisiones mediante Ram-Air en las motocicletas de competición, surgió otro problema relacionado con las suspensiones por horquillas. De cara al rendimiento del motor, el punto óptimo para localizar la entrada de aire de la admisión resulta ser el frontal de la motocicleta, esto supone que el conducto de aire se ve obligado a pasar por la zona en la que se localiza el eje de dirección. De manera que hay que dividir el conducto en dos partes para poder sortear el eje de dirección, lo que empeora el rendimiento del proceso de admisión.



Figura 4.6: Entrada al airbox de una motocicleta de competición con horquilla convencional.



Figura 4.7: Entrada al airbox vista desde la zona trasera de la motocicleta.

La otra opción pasa por eliminar el eje de dirección de la motocicleta, en lo que se conoce como pipa de dirección “stemless” y apoyar la tija superior e inferior en dos rodamientos, dejando espacio libre al paso de aire. Aunque aerodinámicamente sea una buena opción, en la práctica no hay muchas motocicletas que se decanten por esta solución. Esto se debe, principalmente a las quejas de los pilotos de competición, que argumentan recibir menores sensaciones que les permita conocer lo que está ocurriendo en el tren delantero.

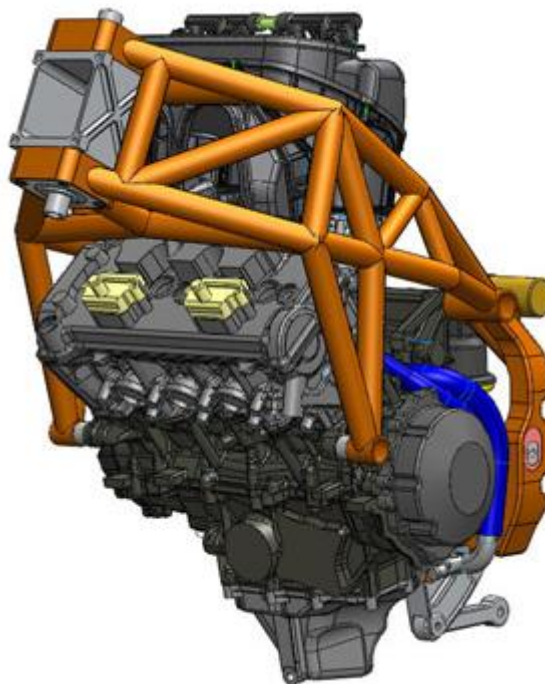


Figura 4.8: Esquema de un chasis equipado con una pipa “stemless”.

En resumen, la suspensión por horquillas plantea una serie de importantes problemas, muchos de los cuales tienen su raíz en la propia concepción básica del sistema. Con el diseño de esta suspensión alternativa se pretenden eliminar muchos de esos inconvenientes.

4.2. ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DE LA SUSPENSIÓN DELANTERA DE LAMOTO2

El proyecto “LaMoto2” comienza a gestarse a finales de 2010 en el seno de la revista “*La Moto*”, cuando se plantea la posibilidad de diseñar una motocicleta de competición, con la intención de hacerla competir en el Campeonato de España de Velocidad (CEV Buckler), publicando mes a mes los progresos en el desarrollo.

Con este proyecto, se pretendía, en parte, reabrir el debate sobre los sistemas de suspensión delantera y, por otro lado, demostrar la eficacia de los sistemas alternativos, sistemas que en los últimos años por parte de la industria solo han recibido atención desde BMW y Bimota. Por ello, el punto de partida del proyecto era una suspensión delantera basada en un paralelogramo deformable, al estilo de los automóviles, usando dos basculantes superpuestos.

Cuando se habla de competición automovilística se habla de llevar las capacidades de la máquina hasta su límite. En este aspecto, el principal limitante son los neumáticos y, en concreto, su adherencia al suelo. Cuando esta adherencia alcanza su límite, el neumático comienza a deslizarse provocando, normalmente, una caída. Para que los pilotos puedan llevar la motocicleta lo más cerca de este límite sin llegar sobrepasarlo, es de vital importancia que tengan una fuente fiable de información sobre el estado del neumático y su interacción con el asfalto. Esta información proviene de diversas fuentes, pero normalmente está relacionada con las vibraciones que transmiten las suspensiones, los pares resistivos que ofrece la columna de dirección y las aceleraciones angulares de la motocicleta.

Los intentos de motocicletas con suspensiones alternativas que han surgido en la competición moderna siempre han sido criticados por los pilotos por la falta de información que estos transmitían, también conocida como “falta de sensibilidad”.

Resulta imposible diferenciar si estos problemas de sensibilidad tienen su origen en el propio funcionamiento de los sistemas de suspensión alternativos o están causados por el uso exclusivo de sistemas de horquillas durante el periodo de formación de los pilotos de competición. En cualquier caso, lo cierto es que éstos no se encuentran cómodos con sistemas distintos a las horquillas. Resolver esta cuestión ha sido el principal objetivo del diseño planteado en el presente documento. Por ello era de vital importancia tener en cuenta sus necesidades a la hora de diseñar el sistema.

Cuando se planteó el diseño de la suspensión delantera de LaMoto2, se partía de varios requisitos que, a priori, cumpliría una hipotética “suspensión perfecta”. Estos requisitos se basaron en los principios teóricos de funcionamiento de una motocicleta y la experiencia histórica que ya se han mencionado. La concepción básica fue ideada por el equipo de diseño de LaMoto2 partiendo de las siguientes premisas:

- Debía tratarse de un diseño que propusiera una alternativa a la hegemonía de las horquillas telescópicas.
- Debía inducir un efecto anti hundimiento, evitando colapsos durante la frenada.
- Tenía que ser rígido a torsión pero con una cierta flexibilidad lateral para asegurar una buena adherencia en curva.
- Los esfuerzos perpendiculares a la dirección de funcionamiento de la suspensión provocados

por la frenada o los baches debían ser conducidos al chasis de la forma más directa posible.

- Debía tener unos parámetros de funcionamiento similares a una horquilla convencional, de cara a lograr un buen “feeling” por parte del piloto.
- Para lograr imbuir toda la confianza posible en el piloto, era necesario lograr una conexión directa entre el funcionamiento de la suspensión y las manos del piloto, al contrario de lo que ocurre con la Bimota Tesi 3D.
- Debía dejar el mayor espacio libre posible al radiador y al airbox para lograr una óptima refrigeración y admisión al motor.
- Según la normativa, la rueda debe girar 15° a cada uno de los lados de la motocicleta, por lo que el sistema de suspensión debía permitir este giro.
- También se hacía necesario lograr una extracción de la rueda fácil y rápida.

De esta manera, se planteó un primer diseño basado en un doble brazo oscilante, en el que se usaría un buje similar al diseñado por Jack Difazio. La idea recibe inspiraciones de distintos sistemas históricos de suspensión alternativa y las mezcla dando lugar a un sistema que combina las ventajas de cada uno de ellos, intentando minimizar sus inconvenientes.

Como se puede ver en la figura 4.9, se trata de una idea que separa la suspensión y la dirección en dos mecanismos distintos. En cuanto a la suspensión, ésta se compone de una horquilla rígida (1) que se encarga de sujetar la rueda; la horquilla se une al chasis mediante dos brazos basculantes (2) cuya geometría será la que definirá las cotas de la motocicleta, la trayectoria seguida por la rueda y el grado de anti hundimiento. Tal y como se puede apreciar, la horquilla vertical, no puede pivotar, por lo que se recurre a montar la rueda sobre un buje tipo Difazio para permitir el giro.

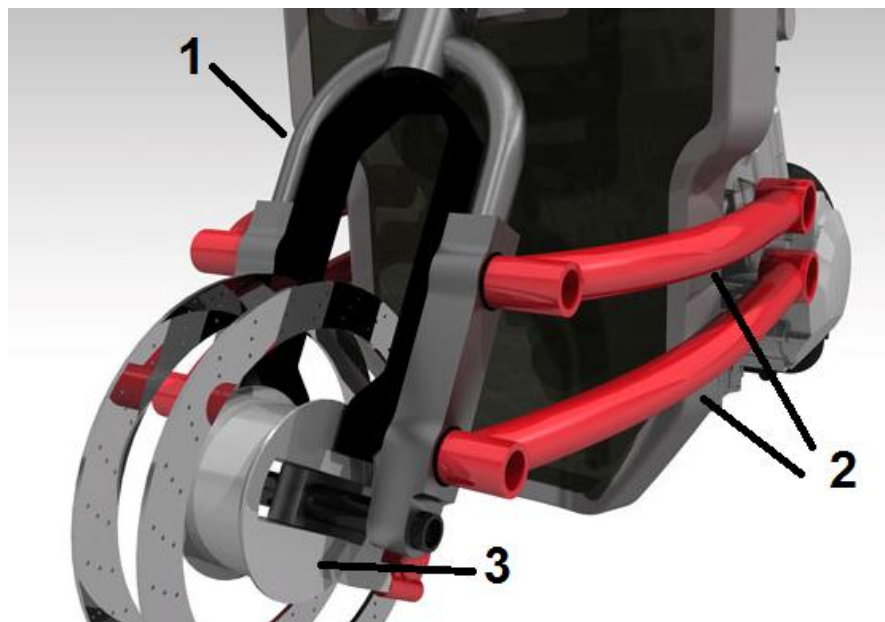


Figura 4.9: Primer esquema de la suspensión delantera de LaMoto2. 1) Horquilla de suspensión. 2) Basculantes superpuestos. 3) Bujes.

Este diseño une elementos del sistema Hossack (la horquilla que sujeta la rueda), el sistema Elf (los dobles brazos basculante a la altura de la rueda) o el sistema Difazio (el buje). Sin embargo, con respecto a la suspensión Hossack, desciende los brazos para lograr una entrada al Air-Box más

limpia; frente al sistema Elf, añade un buje dentro de la llanta, brazos simétricos que otorguen el mismo amortiguamiento lateral en curvas a derechas e izquierdas además de la posibilidad de montar doble disco de freno y, por último, frente al sistema Difazio separa las funciones de dirección, soporte del momento de frenada y control del giro del eje de dirección en brazos distintos, permitiendo diseñar cada uno de ellos de la mejor forma posible.

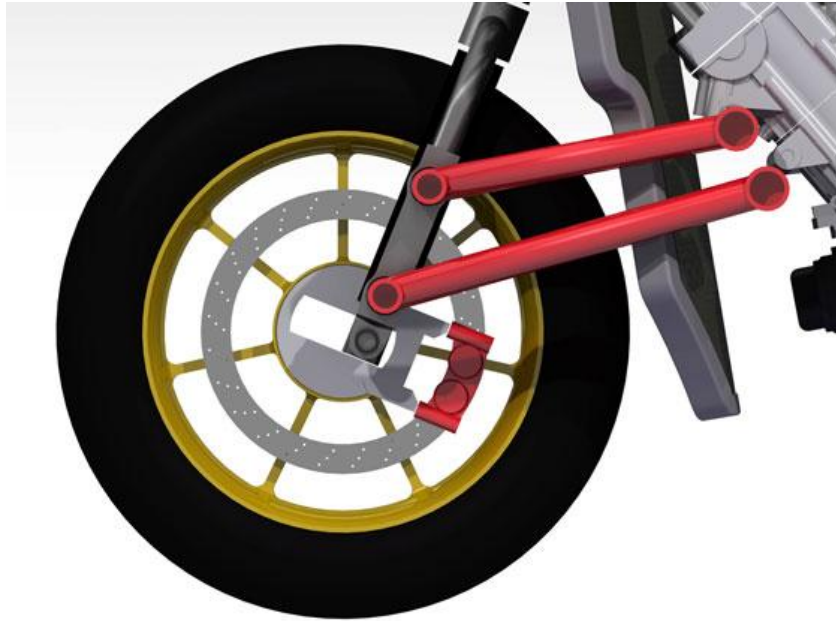


Figura 4.10: Esquema lateral del primer diseño de la suspensión delantera de LaMoto2.

A pesar de que en estos bocetos todavía no había una geometría definida, se puede ver cómo, jugando con los puntos de anclaje de los brazos y su longitud, se puede lograr que la rueda siga prácticamente cualquier trayectoria durante el funcionamiento de la suspensión.

En cuanto al amortiguador, desde el inicio del proyecto se ha contado con la colaboración de la empresa de amortiguadores Öhlins. Para este proyecto, nos recomendaron su modelo TTX36, tanto para la parte delantera como para la parte trasera. El amortiguador cuenta con un recorrido de 60mm; además, nos informaron de que, si queríamos una amortiguación eficaz, deberíamos tener en cuenta que se había diseñado para una relación de movimiento entre la rueda y el vástago comprendida entre 2:1 y 2,2:1.



Figura 4.11: Amortiguador Öhlins TTX 36

Para ayudar al equipo con el diseño, la empresa facilitó varios modelos CAD de su amortiguador, con los que trabajar en la parte de diseño mecánico, y las curvas de amortiguamiento (fuerza resistiva del amortiguador en función de la velocidad del émbolo) dependiendo de la posición del regulador C (habitualmente conocido como el “número de clicks”)

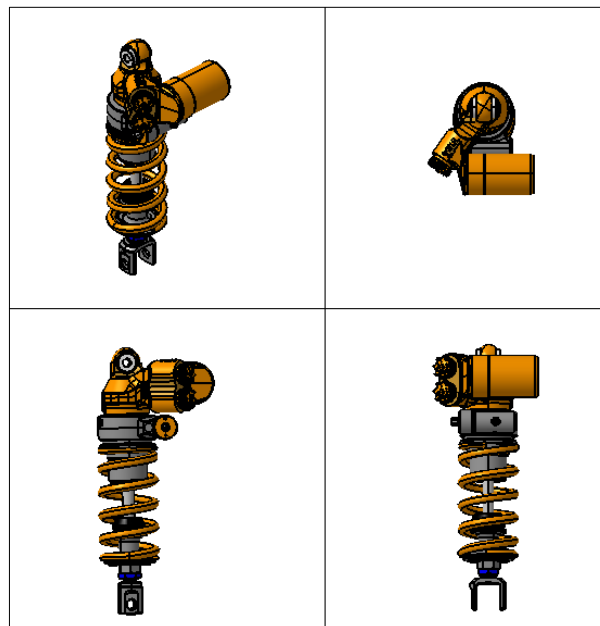


Figura 4.12: Vistas del modelo CAD del amortiguador TTX36 proporcionado por Öhlins.

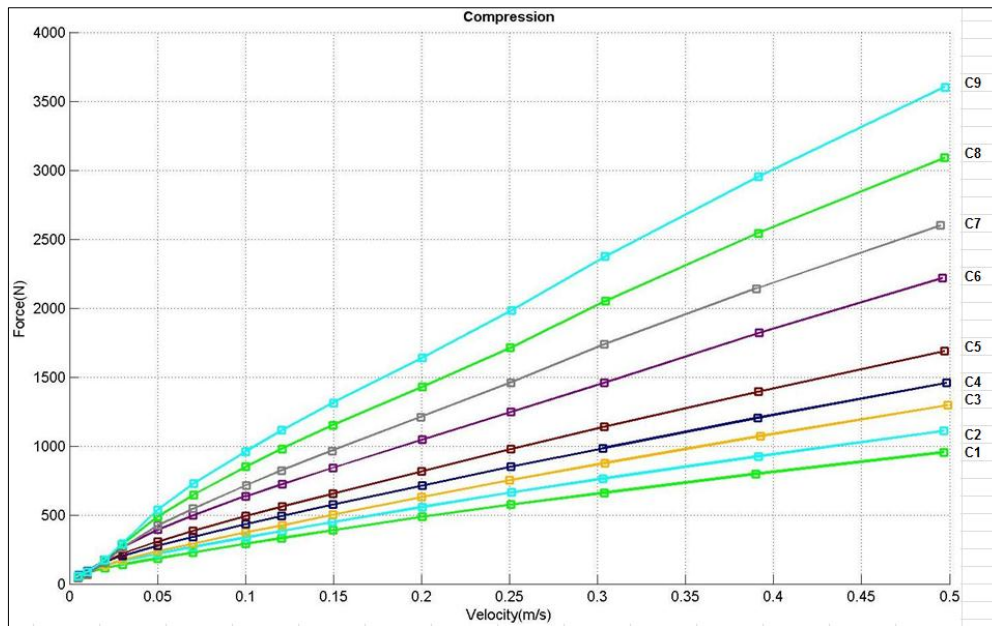


Figura 4.13: Curvas de amortiguación proporcionadas por Öhlins. Fuerza de amortiguación frente a velocidad.

Con estos datos, se tomó la decisión de anclar la cabeza del amortiguador al chasis, y el vástago a uno de los brazos, de manera que se tendría un recorrido de la suspensión de alrededor de 120mm como en cualquier suspensión estándar. Cualquiera de los dos brazos habría sido una opción válida, pero tanto en el aspecto constructivo como a la hora de bajar el cdg, la opción más factible era anclarlo al brazo inferior.

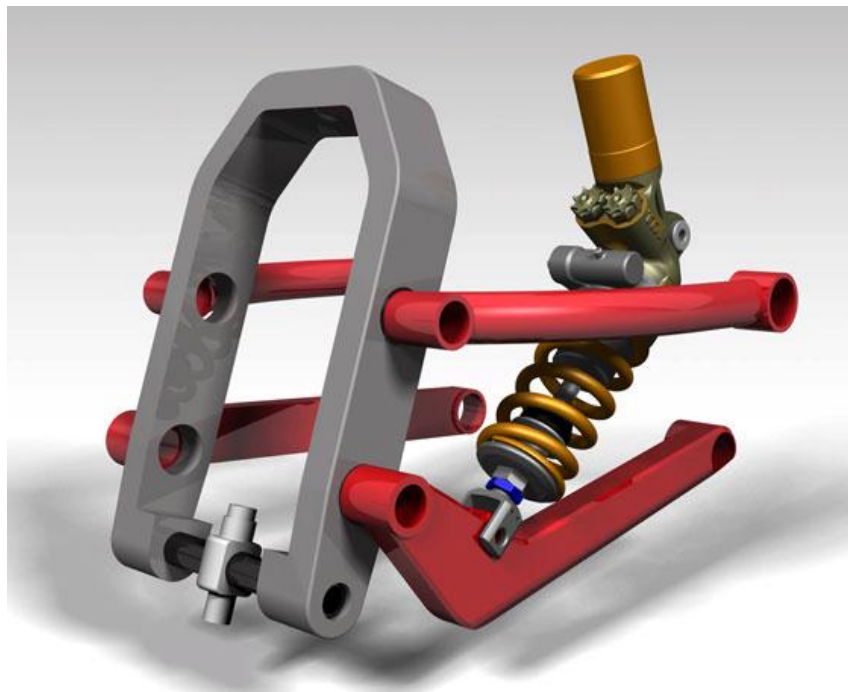


Figura 4.14: Primer loop de desarrollo del sistema de suspensión delantero de LaMoto2.

Finalmente, se hizo necesario cambiar el amortiguador de lado en busca de un mayor espacio, y también se perfiló como indispensable utilizar un sistema de bieletas con un doble propósito,

buscar un mejor punto de anclaje al basculante para lograr que éste no sufriese tantos esfuerzos, y mejorar la progresividad del amortiguador. Después de esto y tras meses de trabajo, simulaciones del comportamiento de la suspensión, simulaciones estructurales, aligeraciones de las piezas etc. el diseño final quedó cerrado.

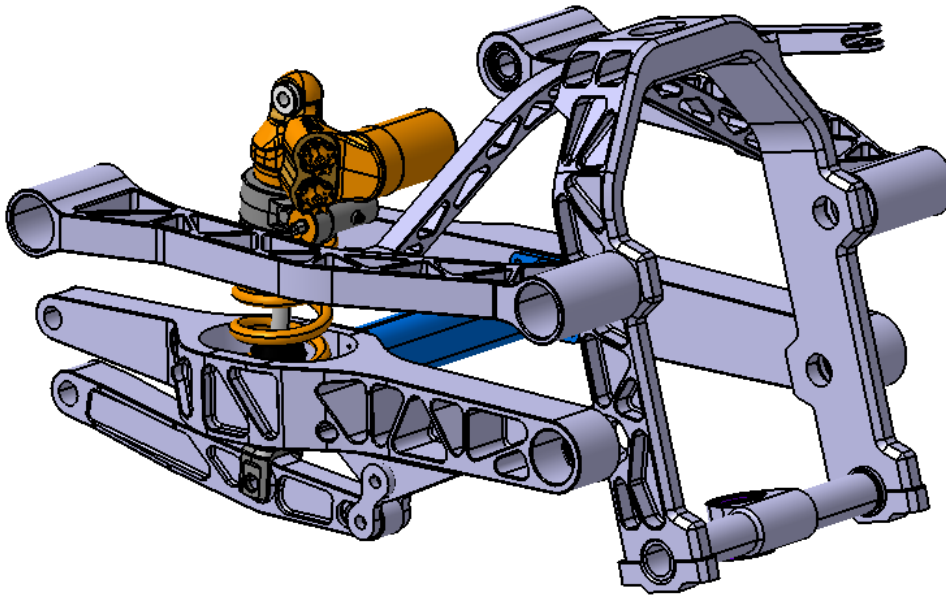


Figura 4.15: Vista en perspectiva del diseño final de la suspensión delantera de LaMoto2.

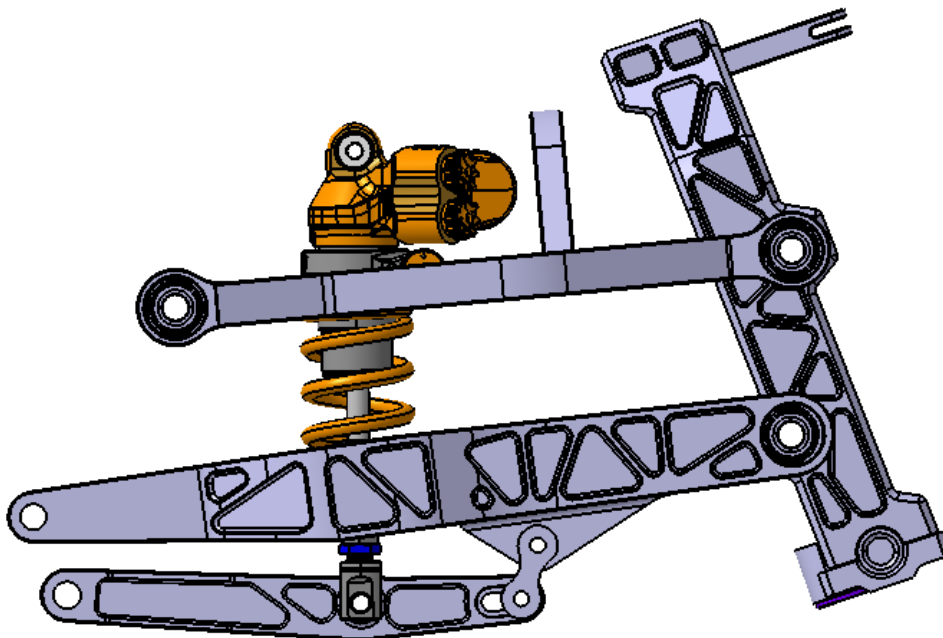


Figura 4.16: Vista lateral del diseño final de la suspensión delantera de LaMoto2.

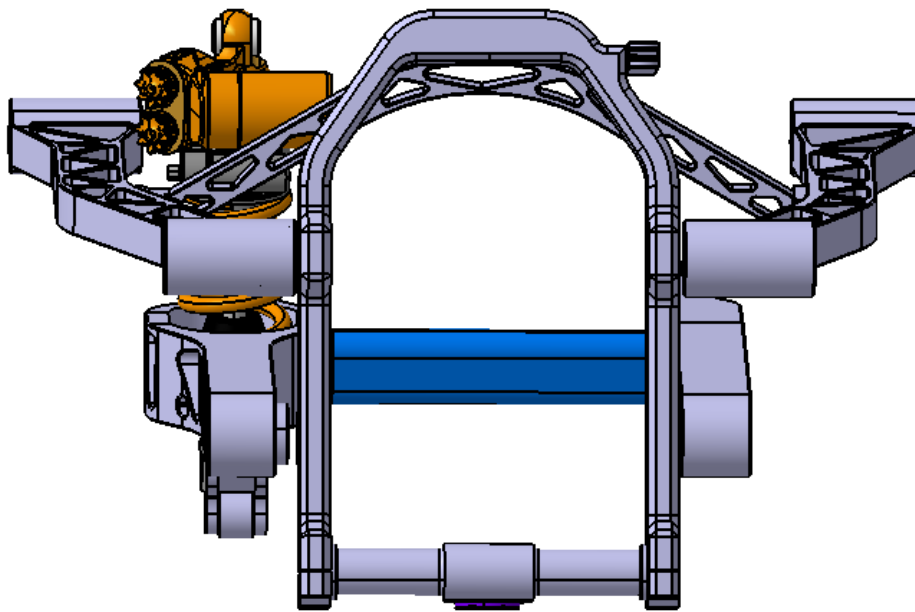


Figura 4.17: Vista frontal del diseño final del sistema de suspensión de LaMoto2.

Aparentemente, y a falta de los test en pista del modelo real, con este diseño se logran cumplir los propósitos propuestos al inicio. Por un lado posee una geometría anti hundimiento, aunque este aspecto se ha potenciado al final del recorrido de la suspensión, de manera que durante la frenada, la suspensión se comprima algunos centímetros pero sin llegar al nivel de las motocicletas equipadas con horquilla.

Con el uso del doble basculante se ha intentado lograr una estructura rígida a torsión gracias a su forma de cuadrilátero y con una ligera capacidad de flexión lateral controlada. Sin embargo, uno de los principales problemas con el que se ha tenido que enfrentar este proyecto es la ausencia de literatura al respecto. De manera que, a pesar de poder medir la capacidad de flexión y torsión del conjunto mediante software de elementos finitos, no podremos saber si es suficiente o es excesiva hasta poner la moto en pista y conocer la opinión del piloto.

Además, gracias a la disposición de la suspensión, se ha logrado que las fuerzas perpendiculares a la dirección de funcionamiento de la suspensión, en especial las de frenada, viajen de la manera más directa posible hacia el chasis, evitando además momentos flectores que obliguen al uso de grandes piezas estructurales.



Figura 4.18: Fuerzas aplicadas sobre la suspensión delantera de LaMoto2 durante la frenada.

Tal y como se puede ver en la figura 4.19, a efectos de los esfuerzos producidos en la suspensión, ésta funciona como una viga biapoyada sobre apoyos simples, de manera que no se transmiten momentos flectores, únicamente esfuerzos de tracción o compresión.

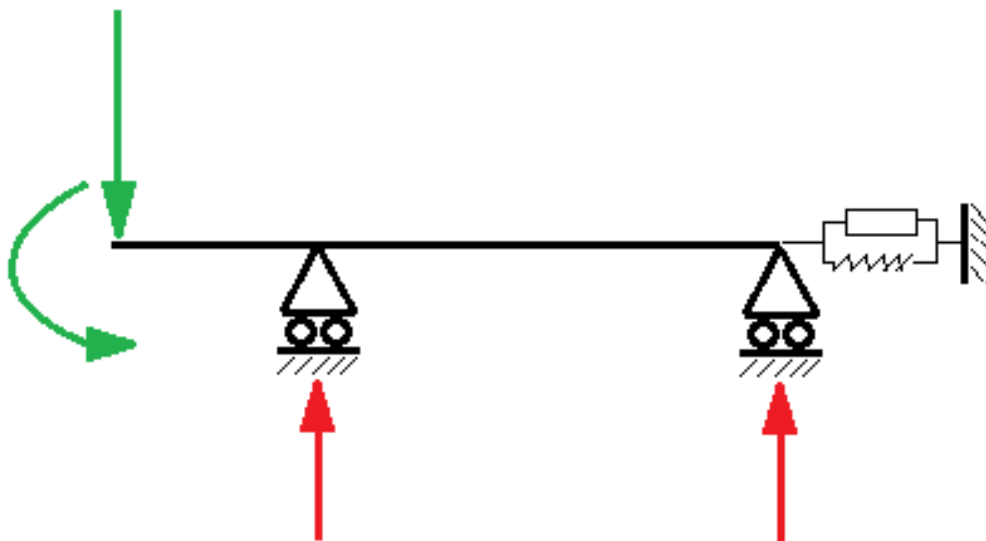


Figura 4.19: Representación esquemática del sistema de suspensión delantera de LaMoto2 y las fuerzas aplicadas sobre éste durante la frenada.

Debido a la ausencia de elementos de la suspensión por encima de la rueda se ha dejado un gran espacio libre para el paso del air-box. Además, gracias a la colocación del amortiguador en un lateral, también hay mucho espacio para la colocación del radiador.

Otros de los objetivos que se consigue con esta disposición de la suspensión es la posibilidad de que la rueda gire un ángulo de 15° que, como se verá más adelante, es exigido por la organización

del campeonato, y que se cumple holgadamente.

Desafortunadamente, hay un objetivo que no se ha cumplido, aunque a priori es el de menor importancia al tratarse de una motocicleta diseñada para carreras de velocidad. Se trata de lograr una suspensión que permita un cambio rápido rueda. El problema procede de las pinzas de freno: debido a que las pinzas de freno están ancladas al buje, cuando se quiere desmontar la rueda, es necesario desmontarlas, lo que lleva un determinado tiempo.

5. Metodología de diseño

Al comienzo de la realización de este Trabajo de fin de grado, se había planteado un boceto preliminar del sistema de dirección. Sin embargo, se trataba únicamente de una idea preliminar que era necesario desarrollar hasta lograr un sistema que cumpliese las premisas impuestas, tanto de construcción, como de resistencia etc.

Este proceso ha seguido un estricto planteamiento que se explica a lo largo del presente capítulo.

5.1. DISEÑO DE PARTIDA

Como ya se ha mencionado al comienzo del documento, las dos principales claves del diseño de la columna de dirección de LaMoto2 eran la adaptación al sistema de suspensión y la obtención de un sistema que transmitiese las suficientes sensaciones al piloto.

Para comprender las necesidades del piloto, es importante entender que, en una motocicleta tradicional, éstas no vienen de dirección y suspensión por separado, si no que constituyen un todo que indica a quien conduce la motocicleta cómo se está portando la rueda delantera. Es por ello que, aparte de lograr que el sistema de dirección transmitiera correctamente las sensaciones de la dirección, también debía lograr transmitir el trabajo del sistema de suspensión.

Como ya se ha explicado en el capítulo referente a la suspensión, la rueda se une a ésta mediante un buje similar al planteado por Jack Difazio. Este buje permite que la rueda pueda pivotar alrededor del eje de dirección independientemente del trabajo de la suspensión. De esta manera, la tarea del mecanismo de dirección consiste en unir ese buje con el manillar.

A la hora de diseñar este mecanismo, desde el principio se planteó que debía cumplir varias premisas: la primera consistía en unir rueda y manillar de manera directa, logrando tener una transmisión del giro totalmente directa, y la mayor transmisión de información posible hasta las manos del piloto; además debía lograr que la información del trabajo de la suspensión también llegase a las manos del piloto de igual manera que llega en una suspensión convencional. Por otro lado, era necesario dejar espacio para lograr una entrada de aire al air-box lo más directa posible, sin renunciar a tener un bajo momento de inercia alrededor del eje de la dirección.

La idea esbozada consistía en usar y mejorar el mismo concepto empleado en la Demonstener D1200R, de manera que el manillar estuviera conectado a la rueda mediante una pieza que abrazara el buje (1), y trasladar el movimiento del manillar hasta dicha pieza mediante una barra telescópica, que finalmente fue remplazada por dos barras (2) para lograr una entrada directa al air-box.

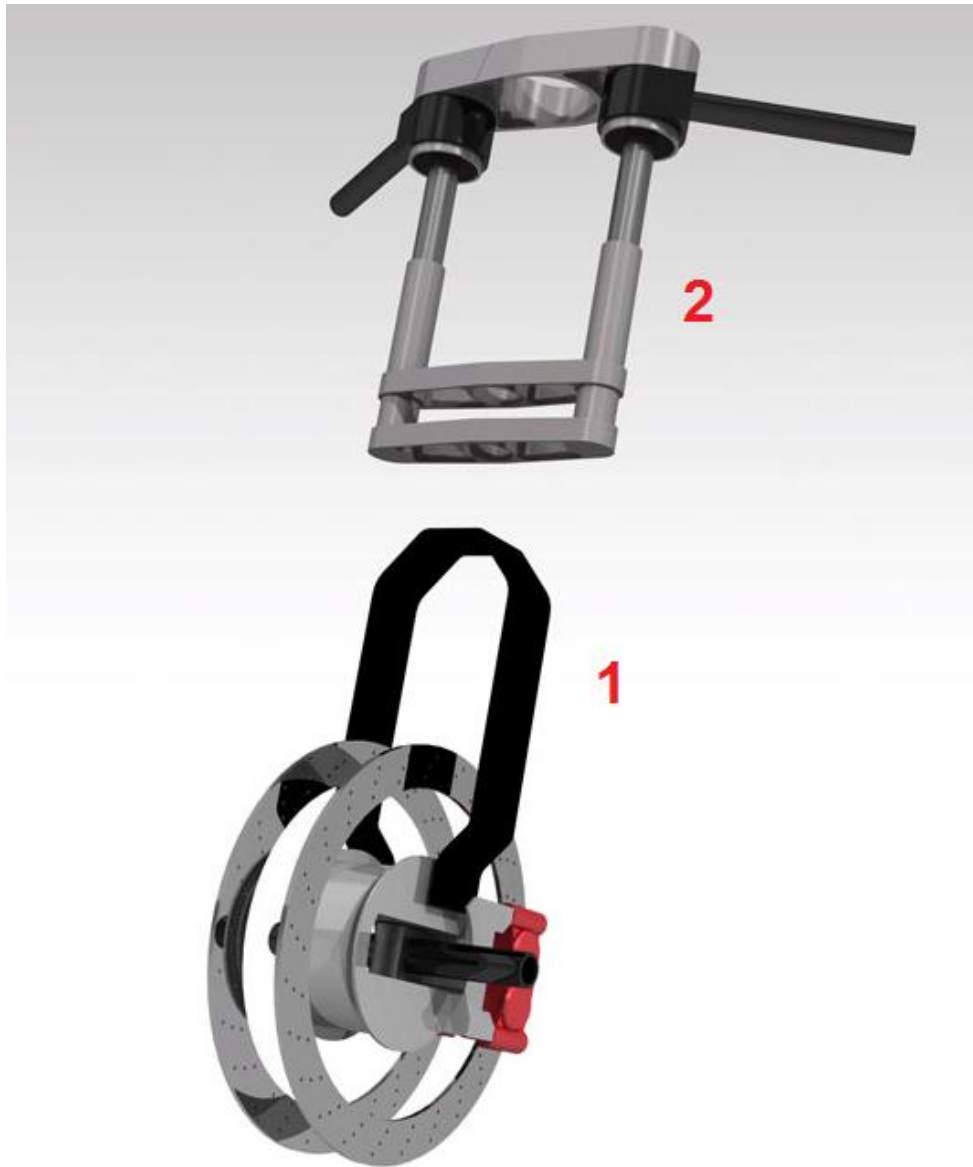


Figura 5.1: Planteamiento inicial del sistema de dirección de LaMoto2.

Este primer boceto planteaba varios retos a resolver:

- Debía llevar el movimiento de giro de la rueda sorteando la horquilla vertical que soporta la suspensión.
- Debía dejar suficiente espacio para la entrada del air-box.
- El manillar está rígidamente unido a un subchasis delantero, mientras que los basculantes de la suspensión dan lugar a un movimiento compuesto durante el funcionamiento de la misma. Esto suponía que el sistema de barras telescópicas debía unirse al resto de elementos mediante rótulas.
- Teniendo en cuenta la psicología del piloto, la dirección tenía que ser visualmente lo más similar posible a una dirección estándar, de manera que éste notase las menores diferencias posibles respecto a una motocicleta estándar.

Tras un primer loop de desarrollo el equipo llega a una solución válida (cuyas características se explican extensamente en el capítulo de diseño de la dirección) que resuelve estas cuestiones. Es en este punto, donde comienza el verdadero desarrollo del diseño que ocupa este documento. A pesar de tener un sistema que, conceptualmente, funcionaba se hacía necesario realizar el diseño final que permitiese llevarlo a la práctica, cumpliendo criterios de resistencia, de fabricación, económicos etc.

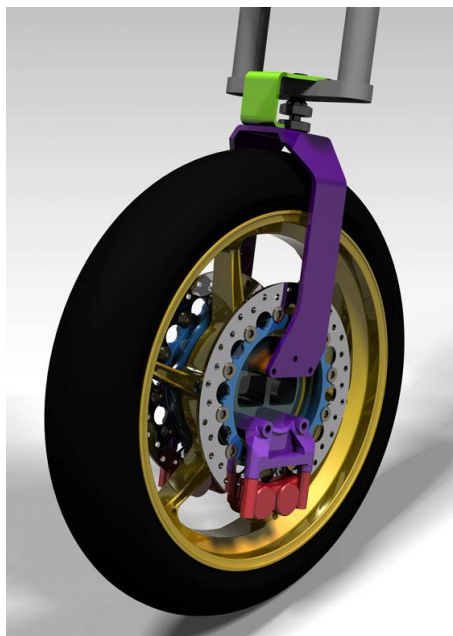


Figura 5.2: Resultado del primer loop de diseño del sistema de dirección de LaMoto2.

5.2. RESTRICCIONES DE DISEÑO

El diseño final se ha realizado con una serie de restricciones que era necesario cumplir para que el sistema funcionase en la moto. Algunas de estas restricciones están relacionadas con la normativa del campeonato y otras tienen que ver con el diseño del chasis, de la suspensión, o simplemente han sido auto-impuestas por el equipo de diseño.

5.2.1. Normativa de la competición (CEV Buckler)

La normativa de la competición establece determinados parámetros que influyen directamente en el diseño de la dirección. Todos los artículos afectan de una forma u otra al diseño completo de la motocicleta, y el reglamento completo puede consultarse en el Anexo. Sin embargo, aquí se referencian una serie de artículos que son los que afectan de forma más directa a la construcción de la dirección.

“11. Diseño de Chasis, Construcción y carenado

11.1 El chasis será un prototipo, diseñado y construido siguiendo las normas técnicas del FIM Grand Prix. El chasis, basculante, depósito de combustible, asiento y carenado/colín, no pueden

provenir de una motocicleta de producción, deben ser prototipos.

14. Suspensión

14.1 Están prohibidos aquellos sistemas de suspensión activos o semi- activos y /o controles electrónicos de cualquier aspecto de la suspensión, incluyendo aquellos que controlen la altura del piloto. Los ajustes para la suspensión y los sistemas de los amortiguadores de dirección sólo pueden ser realizados de manera manual y mediante ajustes mecánicos/hidráulicos.

15. Llantas

15.1 Solo se permiten las siguientes medidas en las llantas: Delantera, 3.75" x 17" Trasera, 6.00" x 17".

- **Normativa de la FIM**

Como se ha podido ver, en numerosas ocasiones, la normativa del CEV, delega en la normativa de la FIM. A continuación se detallan los aspectos de la normativa del FIM que afectan al sistema de dirección delantera y que no vienen detallados (en inglés en el original).

"2.7.2 Dirección

2.7.2.1. Los manillares deben tener una anchura no menor de 450mm y las puntas deben ser sólidas o estar cubiertas de goma. La anchura de los manillares se define como la anchura medida entre la parte más externa del puño de goma y del puño del acelerador

2.7.2.2. Tiene que existir, al menos, 15 grados de giro de la dirección hacia cada lado de la línea central.

2.7.2.3. Los topes de la dirección deben estar instalados de manera que se asegure una distancia libre de, al menos, 30mm entre el manillar y el depósito de combustible y/o el carenado, en los extremos de giro de la dirección.

2.7.8 Distancias libres

2.7.8.1. La motocicleta, descargada, debe ser capaz de ser inclinada un ángulo de 50 grados respecto a la vertical sin tocar el suelo con ninguna parte excepto el neumático.

2.7.8.2. Debe haber una distancia libre de, al menos, 15 mm alrededor de la circunferencia del neumático en cualquier posición de la suspensión y de la dirección, y en cualquier posición de ajuste de la rueda."

Tras la lectura de la normativa que rige el campeonato y tras diversas reuniones en las que se analizaron los requerimientos de un sistema de suspensión, las restricciones de diseño planteadas finalmente fueron las siguientes:

- Ángulo de giro de la rueda: 15° hacia cada lado (normativa de la competición).

- Distancia mínima entre la circunferencia del neumático y cualquier otro elemento: 15mm (normativa de la competición).
- Recorrido de la suspensión: 120mm (debido a las características del amortiguador).
- Ángulo relativo entre dirección y suspensión comprendido entre 0° - 2° (debido a la geometría de la suspensión delantera).
- Par de fuerzas causado por las pinzas de freno y que será soportado por la horquilla de dirección: 600 N·m (debido a las necesidades de frenada).

Además de estas restricciones se planteaban otras necesidades menos tangibles y cuyos valores exactos para ser cumplidas satisfactoriamente eran desconocidos, en estos casos, se ha llegado a un consenso entre todo el equipo de diseño, pero hasta la construcción del modelo definitivo no se podrá saber si han sido suficientes o no. Entre ellas se encontraban:

- Reducir al máximo posible la holgura en la cadena cinemática de la dirección. Para ello, uno de los factores decisivos era la interferencia entre las barras telescópicas que transmiten el par de fuerzas cuando la suspensión está completamente descargada. Para ello, se impuso un mínimo de 50mm de solape entre botellas, con la condición de que sería aumentado siempre que el diseño lo permitiese.
- Lograr un buen “feeling” del trabajo de la suspensión por parte del piloto. Para ello se han introducido unos muelles dentro del conjunto de barras telescópicas. Estos muelles debían ser lo suficientemente rígidos como para transmitir las vibraciones de la suspensión de manera efectiva. Sin embargo, unos muelles excesivamente rígidos interferirían con el funcionamiento de la suspensión, y además, aplicarían demasiadas cargas sobre el subchasis delantero. De esta forma, se decidió emplear muelles de rigidez cercana a 0.6 N/mm.
- Lograr la mayor rigidez posible de sistema. Para lograr una motocicleta con una columna de dirección efectiva, que pueda ser llevada al límite por los pilotos, es importante aumentar la rigidez en todas las fuentes de flexibilidad posibles. A la hora de simular las piezas se ha establecido que toda la cadena cinemática de la columna de dirección debe tener una deformación torsional menor de 1° .

5.3. CRITERIOS DE DISEÑO

A la hora de realizar el diseño final de la columna de dirección se siguieron una serie de criterios que condicionaran las decisiones a tomar en busca de una motocicleta lo más competitiva posible.

- Aumentar la rigidez, tanto del sistema de dirección como del sistema de suspensión. En el proyecto Demonstener quedó probado que, con una baja rigidez en el tren delantero, la motocicleta podía circular sin problemas, pero las sensaciones de los pilotos no eran completamente satisfactorias y no les permitían exprimir las capacidades de la motocicleta hasta el punto que es necesario en la competición.
Por ello, todas las decisiones tomadas durante el proceso de diseño iban encaminadas a mejorar la rigidez de la columna de dirección.
- Reducir el peso del sistema y el momento de inercia alrededor del eje de dirección. Como ya se ha explicado, la reducción del peso de la motocicleta en general y de la columna de

dirección en particular, mejoran la agilidad y manejabilidad de la misma. Estos dos factores son de vital importancia en una motocicleta de competición. Además el momento de inercia del sistema de dirección es crítico en la transmisión de las sensaciones.

Este criterio choca frontalmente con el aumento de rigidez, por lo que, en este aspecto, han sido de gran utilidad los análisis MEF que se han realizado. Gracias a ello, se ha podido optimizar la relación rigidez/peso.

- Lograr un sistema funcional. Sin un sistema funcional que pueda ser usado en condiciones reales el proyecto no tiene sentido, ya que su fin último es la fabricación de un prototipo de la motocicleta. Por ello, todas las piezas diseñadas tenían que ser testeadas y planteadas para funcionar bajo todas las circunstancias que puedan darse en la competición real. Para ello, el uso de programas de simulación de sólido rígido y el análisis de colisiones en CATIA han sido calve.
- Obtener un diseño capaz de ser fabricado. Si el diseño de una pieza no podía llevarse a la realidad, debía ser desechado directamente. En este aspecto, es importante mencionar que, normalmente, un producto se diseña en función de los proveedores de confianza de la empresa. Sin embargo, al comienzo del proyecto, no se tenían proveedores, de manera que las piezas fueron diseñadas para poder ser fabricadas en las máquinas más estándar existentes: doblado de tubos y chapa, torno y centro de mecanizado de 3 ejes. Por esta razón, todos los diseños debían adaptarse a las características básicas de las piezas que pueden fabricarse mediante estos tres métodos.

El torno permite generar piezas de revolución y realizar roscados internos o externos, pero no puede realizar ningún mecanizado que no sea simétrico respecto al eje de revolución.

En el centro de mecanizado de tres ejes es capaz únicamente de realizar mecanizados en planos paralelos al horizontal, pudiendo variar únicamente la altura y posición de la herramienta. Sin embargo, variando el agarre de la pieza, se pueden crear formas mucho más complejas.

Para la mayoría de casos, se desechó la soldadura puesto que el gradiente de temperatura que provoca en la pieza, induce tensiones internas y deformaciones que, a priori, son desconocidas.

- Crear un conjunto montable. Si el proyecto pretendía llevarse a la realidad era necesario que todos los conjuntos y subconjuntos pudieran ser montados y desmontados. Por ello, uno de los pasos de la validación del sistema ha consistido en el planteamiento de un procedimiento de montaje para todas las piezas.
- Recopilación de datos mediante ingeniería inversa. Antes de crear un diseño, hacer un estudio de las condiciones de trabajo de las motocicletas de competición reales se perfilaba como un procedimiento obligatorio. Estos datos debían ser tenidos en cuenta a lo largo de todo el proceso de diseño. En el capítulo 6 se explica en detalle este estudio.

- Realizar un estudio de resistencia mecánica. En cualquier diseño mecánico, resulta de obligado cumplimiento comprobar mediante MEF si el sistema es capaz de soportar las cargas mecánicas a las que se le va a someter. En este caso, se usaron los datos obtenidos de los experimentos de ingeniería inversa para dimensionar definitivamente las piezas.

Conocidos y establecidos los criterios de diseño, se establece un **proceso de diseño** que se ha seguido con todas y cada una de las piezas. Este proceso responde al esquema presentado en la figura 5.3.

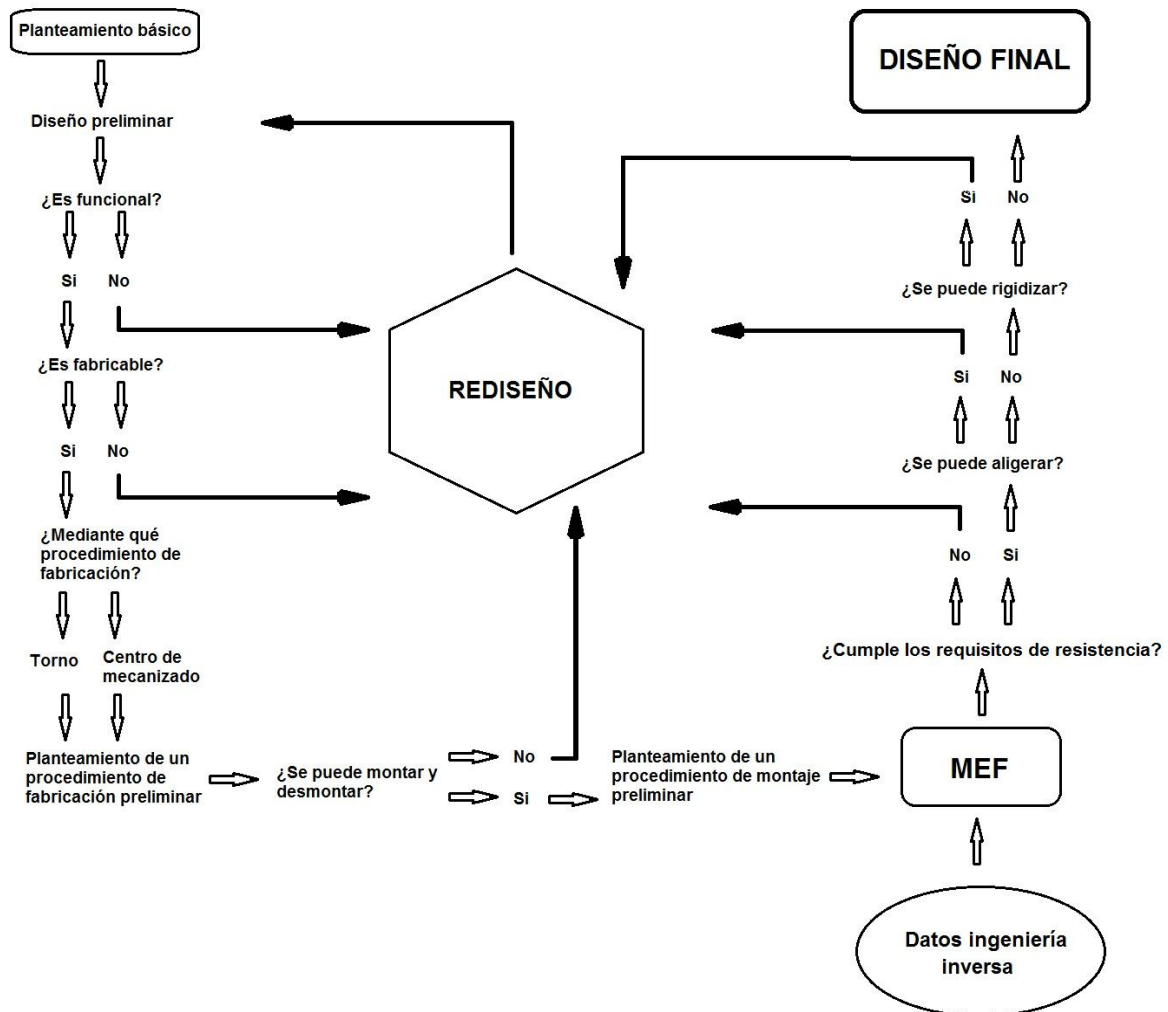


Figura 5.3: Algoritmo del proceso de diseño de cada una de las piezas de LaMoto2.

METODOLOGÍA ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Debido a la importancia de los análisis de resistencia mecánica era importante establecer un procedimiento de análisis exclusivo para este paso del proceso de diseño.

Para obtener unos resultados fiables era de vital importancia realizar unos análisis cuyas condiciones sean lo más similares posibles a las condiciones reales de trabajo de las piezas. Por ese

motivo, no se han analizado cada una de las piezas de la columna de dirección por separado. Si no que, las piezas, se han estudiado en subconjuntos que soporten distintos tipos de cargas.

Por ejemplo, los esfuerzos más importantes que soportan la tija y los semimanillares son los esfuerzos de frenada, mientras que para el conjunto de las botellas telescópicas, su máximo esfuerzo supone la transmisión del par de fuerzas de giro. Por ello, estos dos subconjuntos se han analizado por separado.

A la hora de realizar cada uno de los análisis, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Cálculo y justificación de las fuerzas sufridas. Mediante los ensayos de ingeniería inversa, datos proporcionados por los fabricantes de componentes o valores encontrados en la literatura.

Para proteger las piezas frente a posibles sobrecargas imprevistas, se ha usado un coeficiente de mayoración de las cargas $f_{mayo} = 1,5$.

- Modelación de las interacciones entre componentes del subconjunto. Para que el modelo numérico fuese lo más fiel posible a la realidad resultaba importante definir correctamente las interacciones entre los elementos del subconjunto (uniones atornilladas, uniones soldadas, deslizaderas etc.)
- Modelación de las condiciones de contorno. Para poder modelar las interacciones del subconjunto con elementos que no aparecen en el ensayo, era necesario definir cuidadosamente unas condiciones de contorno. De la precisión de este paso dependía en gran medida la validez del resultado final del análisis.
- Aplicación de las cargas. Calculadas y analizadas las cargas que actúan sobre el subconjunto, era necesario implementarlas en el modelo numérico de la forma más similar a la realidad. También resultaba de vital importancia hacerlo de la manera correcta.
- Elección del caso más desfavorable. En todos los anteriores puntos, siempre se ha elegido el caso más desfavorable para asegurar que, incluso bajo las peores condiciones de uso, la integridad de la motocicleta no correrá peligro.
- Creación de una malla preliminar. Al comienzo del análisis, se ha generado una malla preliminar con unas características y tamaño de elemento estimados en función a las recomendaciones del programa y la literatura relacionada.
- Lanzamiento de un caso inicial y refinamiento de la malla. Tras obtener unos primeros resultados, se han analizado los puntos de mayor concentración de tensiones y se ha refinado la malla en esos puntos en busca de una mayor precisión.
- Comprobación de resultados y validación de piezas. Una vez obtenidos los resultados, se validará la pieza usando un coeficiente de seguridad $\gamma=2$.

El coeficiente de seguridad γ , junto con la mayoración de cargas f_{mayo} , arrojan un coeficiente de seguridad global de 3. En muchas aplicaciones de ingeniería este coeficiente puede resultar insuficiente, pero es importante recordar que se ha diseñado una motocicleta de competición, por lo que es necesario trabajar al límite de todos los elementos en busca de las mayores prestaciones posibles.

En cuanto a la fatiga de los componentes, no se ha realizado ningún análisis debido al corto periodo de vida de las motocicletas de competición. Se ha considerado que, con el coeficiente de seguridad utilizado, se obtienen unas cargas lo suficientemente alejadas del límite elástico para considerar que la fatiga de los componentes no supondrá ningún riesgo para la integridad estructural de los mismos durante su ciclo de vida.

6. Ensayos previos

El principal pilar sobre el que se diseña cualquier mecanismo es el conocimiento de las condiciones de trabajo. Sin conocer estas condiciones, es imposible realizar un diseño satisfactorio, por ello, a la hora de diseñar LaMoto2 se han realizado varios ensayos previos en los que se pudiera tomar datos del ambiente de trabajo de una motocicleta de competición.

6.1. TELEMETRÍA

El primero de estos experimentos consistió en el análisis de la telemetría de una vuelta al circuito de Albacete de motocicleta de la categoría Moto2, la misma categoría para la que se ha diseñado LaMoto2. Sobre todo se han analizado las aceleraciones a las que está sometida una motocicleta de estas características durante una vuelta, y el trabajo de las suspensiones delanteras y traseras, además del trabajo de la dirección.

Tabla 6.1: Datos de la prueba realizada en el circuito de Albacete.

Datos de la vuelta	
Circuito	Albacete
Longitud del circuito	3539.3 m (oficial)
Longitud recorrida	3585.3 m (GPS)
Vehículo	Moto2
Fecha	27/Abril/2010
Número de Vueltas	11
Tiempo de la mejor vuelta	01.33.161

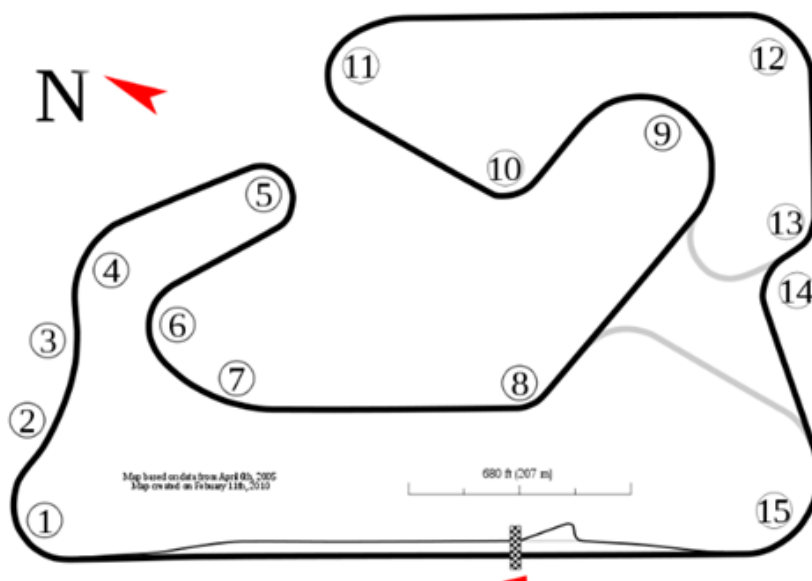


Figura 6.1: Circuito de Albacete

A continuación se presentan los datos extraídos de la telemetría durante dicha vuelta.

VELOCIDAD

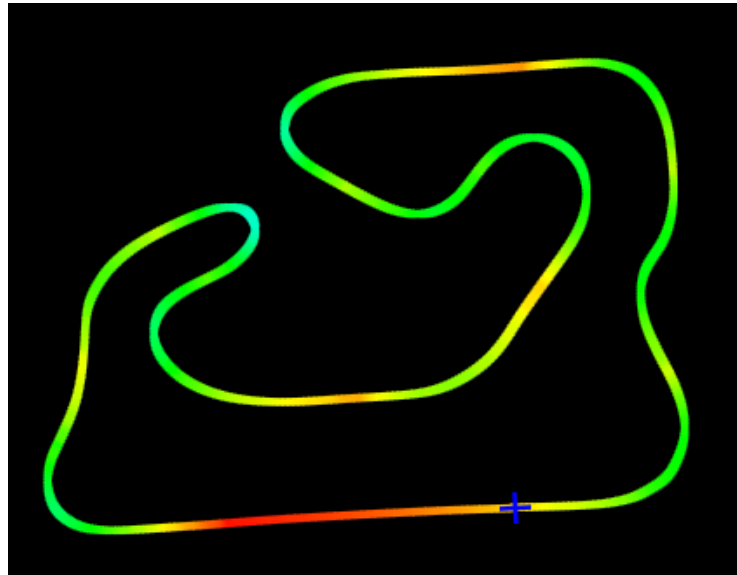


Figura 6.2: Velocidad de la motocicleta en cada tramo del circuito

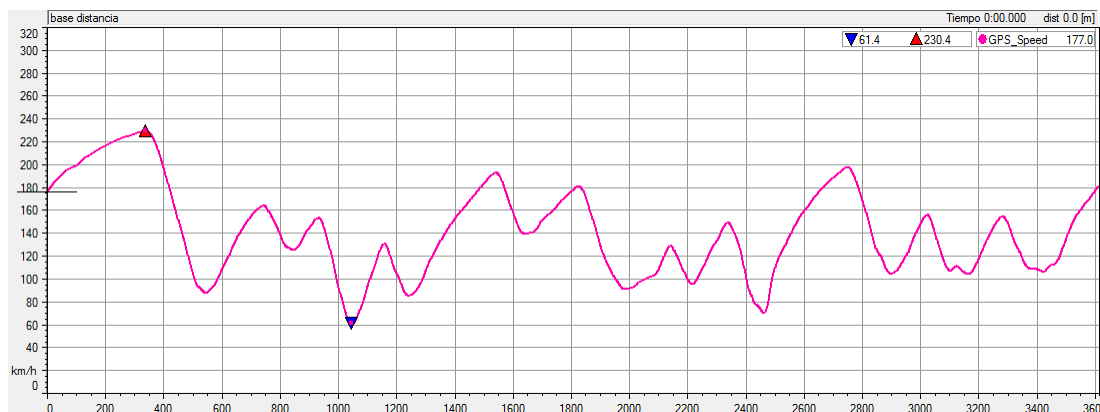


Figura 6.3: Perfil de velocidades de la motocicleta a lo largo del circuito.

RECORRIDO DE LA SUSPENSIÓN DELANTERA

Como se puede comprobar, los mayores hundimientos tienen lugar durante la frenada de la motocicleta. Lo que nos da una idea de que, el principal trabajo al que se ve sometida una suspensión delantera tradicional tiene que ver con la frenada y no con la absorción de irregularidades.

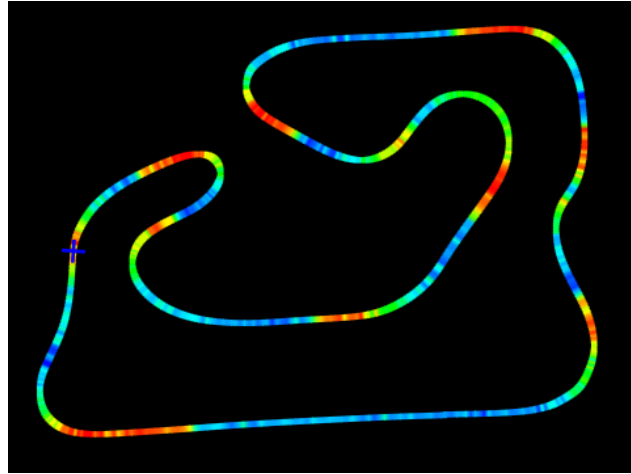


Figura 6.4: Recorrido de la suspensión delantera en cada tramo del circuito.

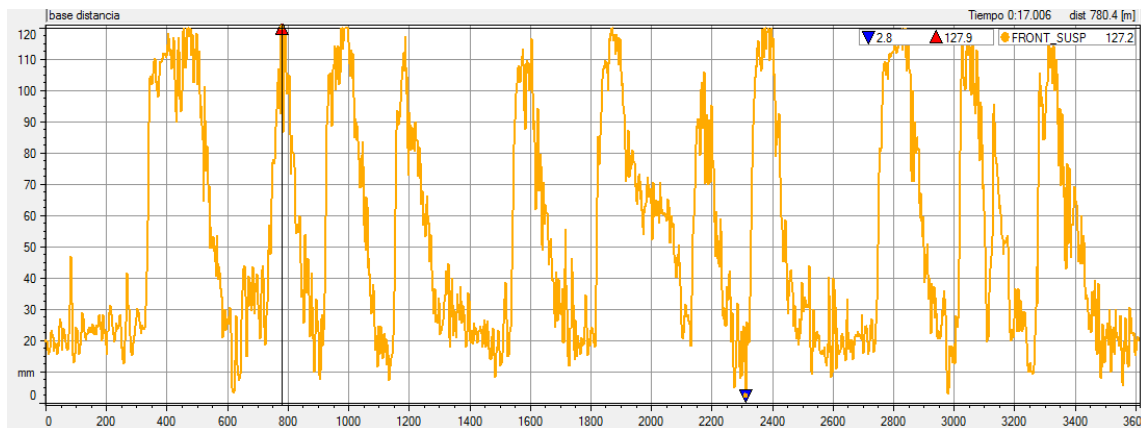


Figura 6.5: Perfil del recorrido de la suspensión delantera a lo largo del circuito.

Estas dos gráficas arrojan datos muy interesantes, ya que en ellas se muestra que el máximo valor de compresión de la suspensión llega a alcanzar los 127.9mm, y tiene lugar a en la frenada de la curva 4.

Es posible pensar que en esta vuelta en particular se produjo un error de medida, o el piloto pisó un bache que normalmente tiende a esquivar ya que, en otras vueltas, la máxima compresión ha tenido lugar en la frenada de final de meta o en la frenada de la tercera curva. Sin embargo en todas las vueltas registradas, el máximo recorrido de la suspensión ha oscilado entre 125 mm y 128 mm.

ACELERACIÓN LONGITUDINAL

Otro de los datos recogidos por la telemetría que pueden resultar muy útiles de cara al desarrollo de LaMoto2 ha sido la aceleración longitudinal.

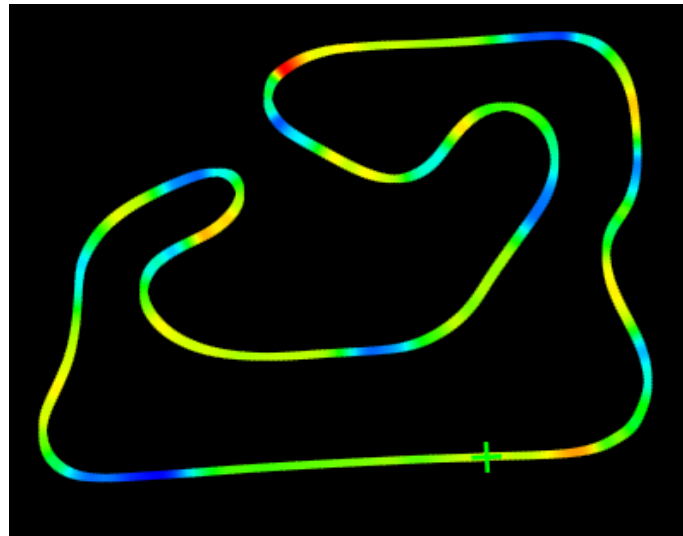


Figura 6.6: Aceleración longitudinal sufrida por la motocicleta en cada tramo del circuito.

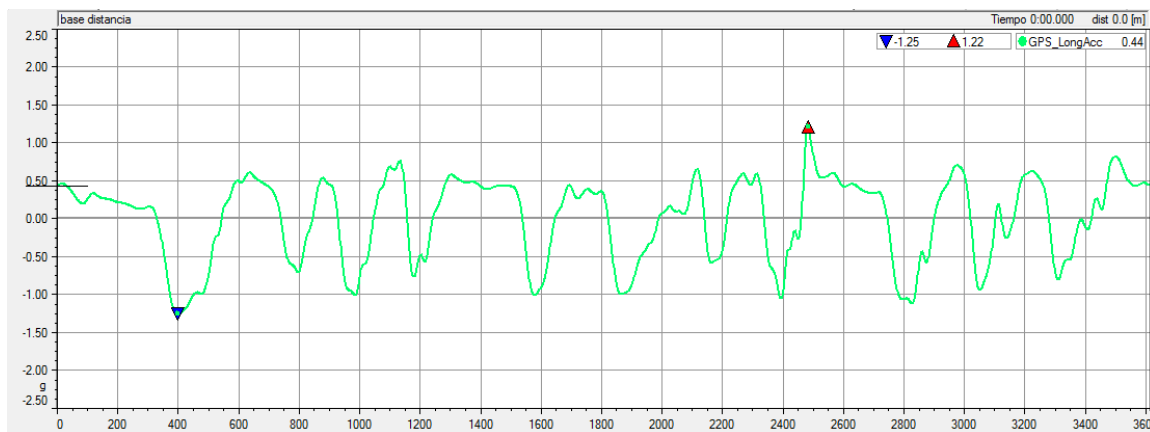


Figura 6.7: Perfil de aceleraciones sufridas por la motocicleta a lo largo del circuito.

El valor que resulta más interesante de cara al diseño de la dirección es el mínimo valor, ya que corresponde con la máxima deceleración. Este mínimo tiene lugar al final de la recta de meta, y alcanza un valor de -1.25 G's. Más adelante, este valor será utilizado en los cálculos durante la frenada.

Combinando la figura 6.7 con el recorrido de la suspensión, se puede ver que están íntimamente ligados y cuando se producen las mayores aceleraciones negativas, es cuando la suspensión delantera sufre los mayores hundimientos:

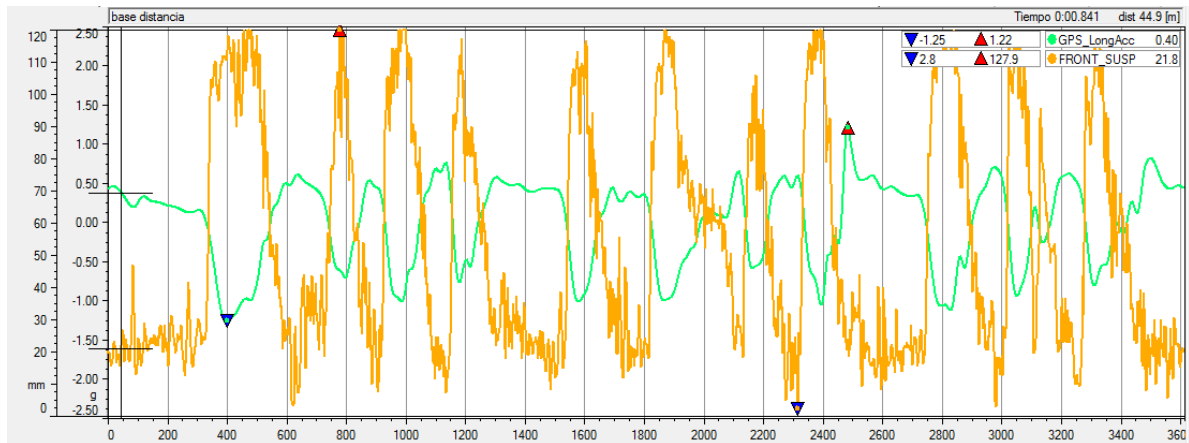


Figura 6.8: Superposición de los perfiles de aceleraciones sufridas y recorrido de la suspensión delantera a lo largo del circuito.

Representando el recorrido de la suspensión (eje y) frente a la aceleración longitudinal (eje x) se obtiene la figura 6.9.

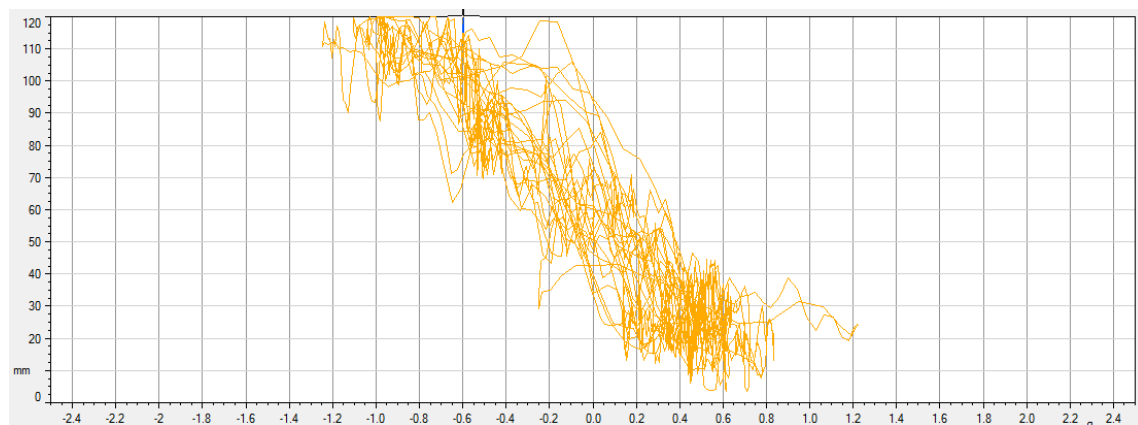


Figura 6.9: Recorrido de la suspensión delantera (eje y) frente a aceleraciones longitudinales sufridas (eje x).

INCLINACIÓN DE LA MOTOCICLETA

Otro dato que ha resultado de gran utilidad durante el desarrollo de LaMoto2, ha sido la inclinación de la motocicleta.

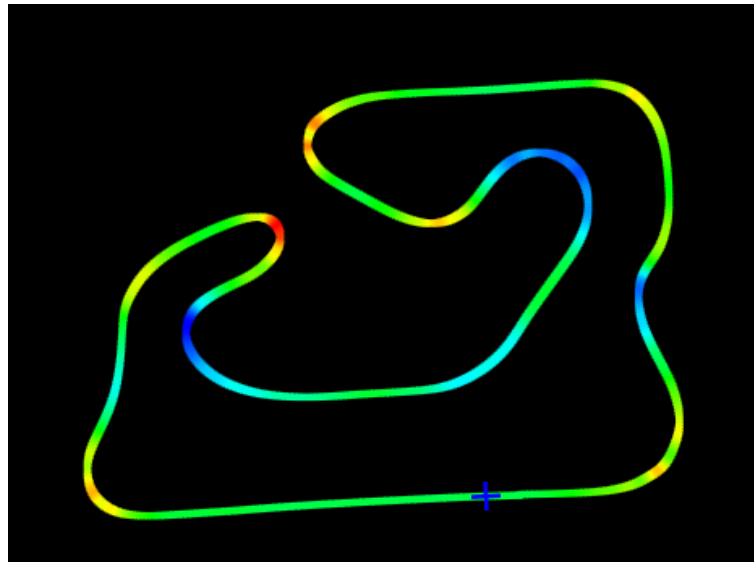


Figura 6.10: Inclinación lateral de la motocicleta en cada tramo del circuito.

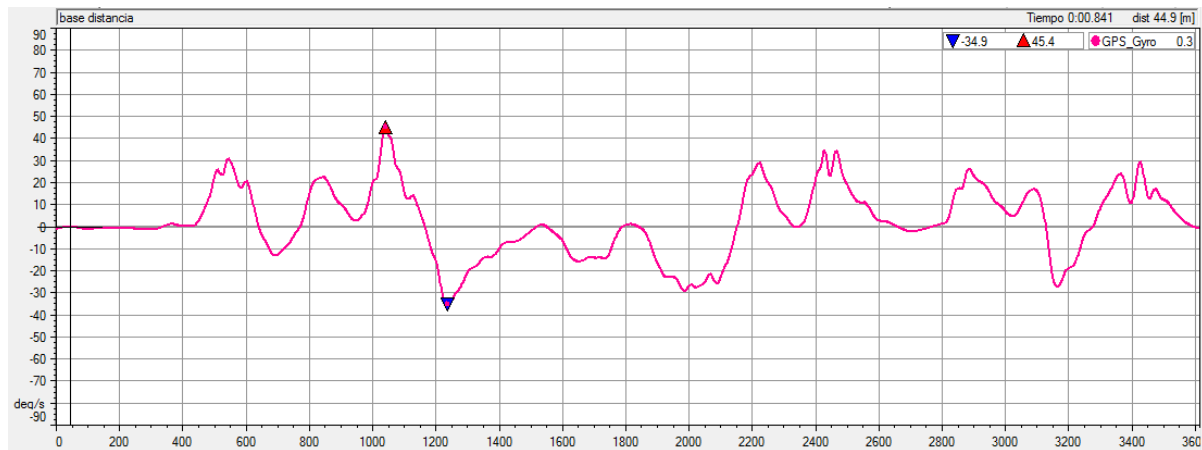


Figura 6.11: Perfil del ángulo inclinado por la motocicleta a lo largo del circuito.

Como se puede ver en las gráficas de las figuras 6.10 y 6.11, el máximo se corresponde con una curva “a derechas” (curva 5) en la que se ha inclinado $45,4^\circ$, mientras que el mínimo se ha dado en la curva 6 (“a izquierdas”) en la que se han alcanzado los $34,9^\circ$ de inclinación. Este dato es muy importante para diseñar el chasis sin que ninguna parte fija roce contra el suelo. También es de vital importancia tener en cuenta este dato a la hora de diseñar las suspensiones delantera y trasera para saber en qué condiciones trabajan, de cara a plantear sistemas con la suspensión lateral adecuada.

6.2. PRUEBAS DE EXTENSOMETRÍA

Debido a la ausencia de esfuerzos de la suspensión delantera sobre la pipa de dirección, el subchasis delantero de LaMoto2 únicamente soporta el peso del piloto y las fuerzas de inercia que este sufre durante las aceleraciones y frenadas. Por ello, para poder diseñar ambos subchasis

correctamente, era necesario conocer esas fuerzas.

Para poder conocer estos esfuerzos se recurrió a la extensometría. Como ya se ha explicado, esta tecnología funciona midiendo la variación de resistencia de un pequeño cable adherido a la superficie de la pieza. De forma que los resultados obtenidos indican la deformación de esta superficie. Conocidas las deformaciones es fácil calcular las tensiones y las cargas sufridas por la pieza en cuestión.

El principal objetivo del experimento era medir los esfuerzos máximos sobre los semimanillares durante una vuelta a un circuito, para ello se usó una motocicleta de competición sobre la que se colocaron diversas galgas extensométricas en los semimanillares. Una vez colocadas y operativas las galgas, un piloto profesional dio varias vueltas con ella en el circuito del Jarama.

RESUMEN DEL EXPERIMENTO

En una primera fase, en un taller las galgas fueron pegadas siguiendo el estricto procedimiento que rige esta fase. Además, se realizaron las conexiones necesarias y toda la instalación eléctrica del sistema. También se protegieron los cables y se fabricó un soporte donde el aparato de medida se mantuviera firmemente sujeto y sufriera las menores vibraciones posibles.



Figura 6.12: Detalle del soporte del equipo de extensometría en la motocicleta.

Una vez la motocicleta y el equipo de medición estuvieron listos, la motocicleta se desplazó al Circuito del Jarama, donde se realizaron un total de doce vueltas con dos pilotos profesionales distintos. Durante estas vueltas, el sistema de extensometría recopiló en tiempo real todas las deformaciones producidas en los puntos donde se pegaron las galgas.



Figura 6.13: Instalación sobre la motocicleta del equipo de extensometría y telemetría.

Además, la motocicleta se equipó con un sistema de telemetría con el que poder comparar los datos extraídos. De esta forma, se podría conocer, no solamente el valor de la deformación en cada momento, sino también a qué acción concreta se correspondía ese valor.



Figura 6.14: Lanzamiento de las mediciones antes del comienzo de la prueba.

En una tercera fase, los resultados se analizaron y se calcularon las cargas a las que correspondían las deformaciones medidas.

COLOCACIÓN DE LAS GALGAS

Debido a que las galgas solo ofrecen la posibilidad de conocer la deformación del punto medido, era necesario diseñar un procedimiento de medida que permitiese conocer correctamente las cargas aplicadas sobre el semimanillar. En este aspecto, la característica más importante del planteamiento es la posición y orientación de las galgas. Esto depende en gran medida de las cargas que se quieran conocer.

El principal objetivo de la medición era conocer la flexión y la tracción/compresión sufrida por el semimanillar (a todos los efectos, un cilindro). Por tanto, se decidió colocar tres galgas unidireccionales sobre la superficie del cilindro. Estas galgas estaban orientadas en la misma dirección que el eje de revolución del cilindro y separadas 90° entre sí, tal y como aparece en la figura 6.15.

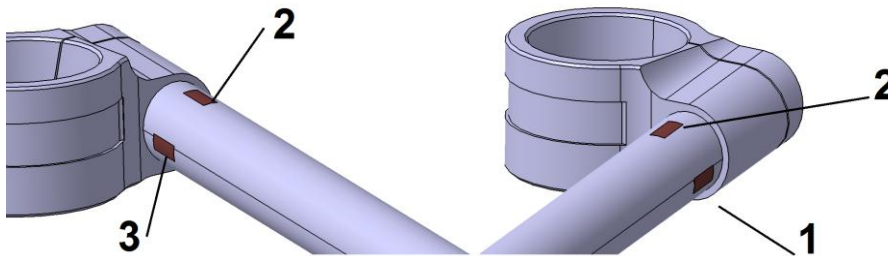


Figura 6.15: Esquema de la colocación de las galgas sobre el semimanillar.

Gracias a esta disposición de las galgas se pueden conocer la flexión y la tracción/compresión de la pieza.

- La diferencia de deformaciones entre 1 y 3 permite conocer la flexión en el plano xy (horizontal).
- La semisuma de valores entre 1 y 3 permite conocer la tracción/compresión del cilindro.
- La diferencia entre el valor de tracción pura y 2 permite conocer la flexión en el plano yz (vertical).



Figura 6.16: Detalle de una de las galgas extensométricas.

PROCESADO DE LOS DATOS

Una vez volcados en el ordenador los datos obtenidos por la extensometría, se obtiene una gráfica en la que se observa la evolución de la deformación de la galga a lo largo del tiempo.

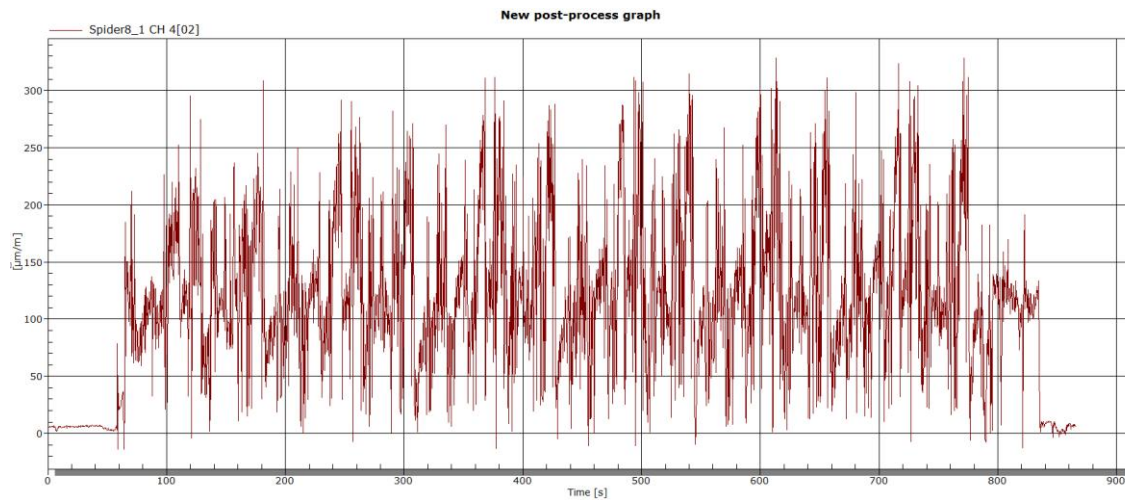


Figura 6.17: Deformación de una de las galgas extensométricas a lo largo del tiempo.

De esta gráfica se extraen las mayores deformaciones, que son las que interesan de cara a dimensionar las piezas. Además, gracias a la telemetría, se puede comparar en qué parte del circuito y que acción se estaba realizando en cada momento. De esta manera se puede saber a qué corresponde la máxima deformación.



Figura 6.18: Gráficas obtenidas de la telemetría utilizada durante la realización de la prueba

Para poder calcular las cargas sobre el semimanillar a partir de los datos de deformación obtenidos de las galgas, es necesario realizar el proceso inverso a un análisis MEF habitual. De esta forma, en vez de imponer unas cargas para conocer las deformaciones y las tensiones, se han impuesto unas

deformaciones y unas tensiones para conocer las cargas.

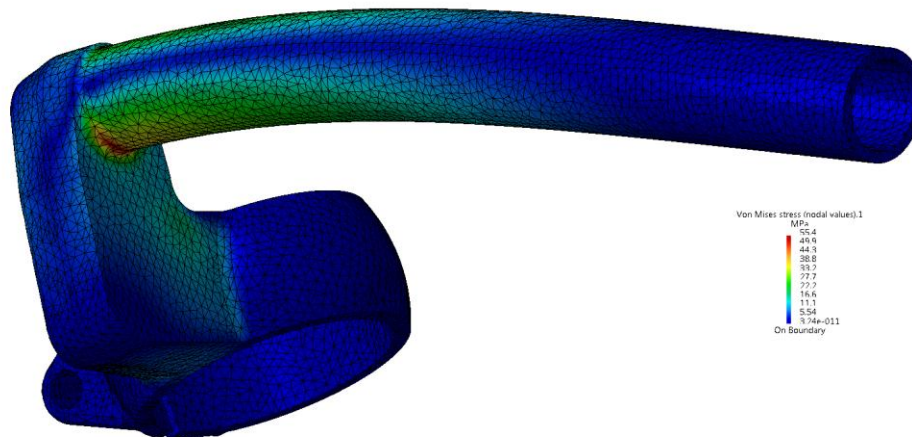


Figura 6.19: Ejemplo del análisis de elementos finitos realizado sobre el modelo del semimanillar.

RESULTADOS

Una vez procesados los datos, se obtiene que la carga máxima en el manillar corresponde a 12kg, alineados con la dirección del antebrazo del piloto.

7. Diseño de la dirección

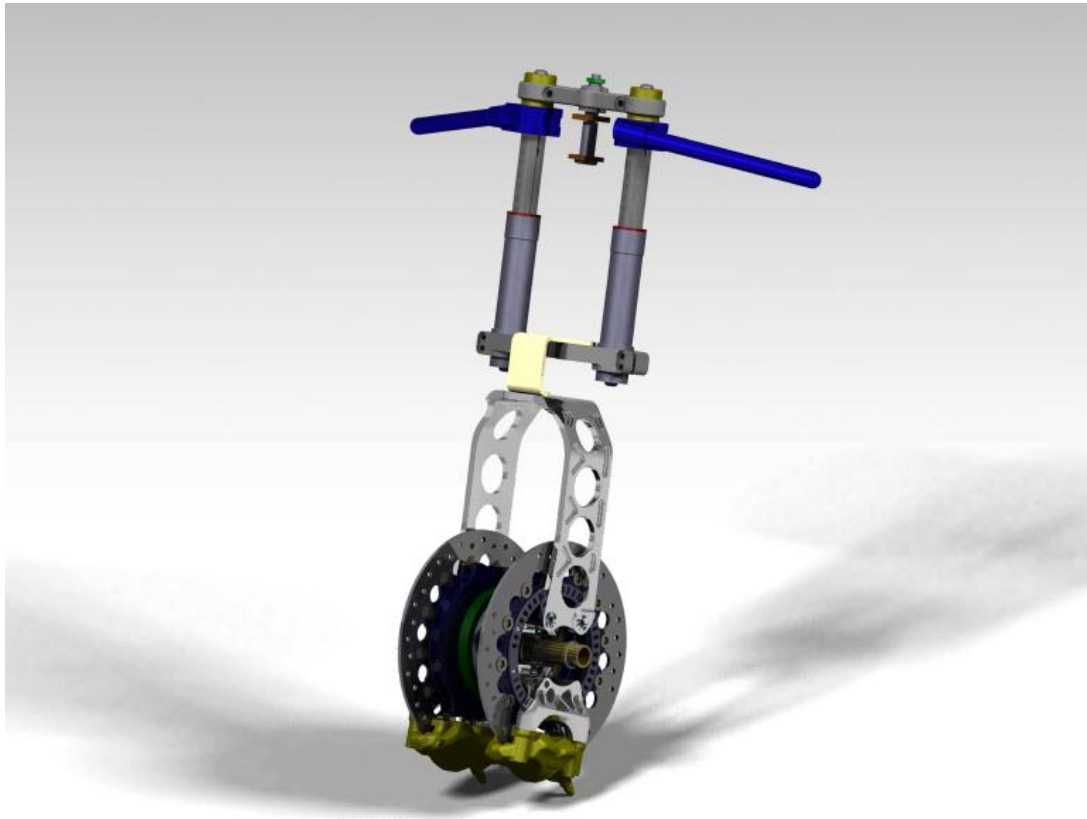


Figura 7.1: Render del diseño final del sistema de dirección de LaMoto2.

Tras el planteamiento básico del sistema inicial, comienza la fase de desarrollo. A continuación se explica el funcionamiento general de la columna de dirección. Y posteriormente se hace un análisis de cada una de las piezas que lo componen.

7.1. EXPLICACIÓN EN DETALLE DEL SISTEMA MECÁNICO DE LA DIRECCIÓN

La clave del sistema de dirección radica en el funcionamiento del buje de la rueda, y el eje que soporta el movimiento de dirección.

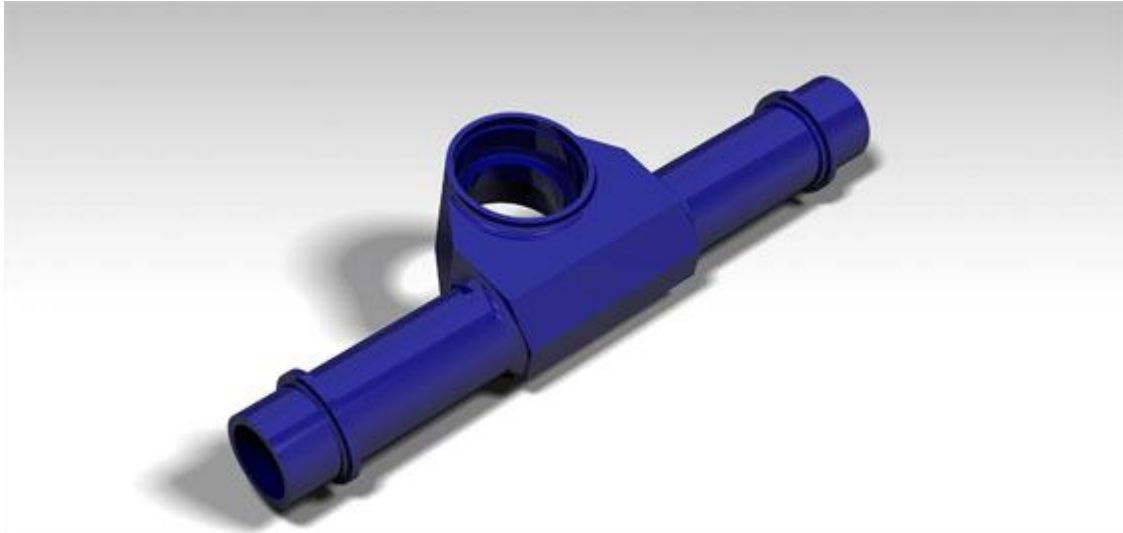


Figura 7.2: Eje de dirección.

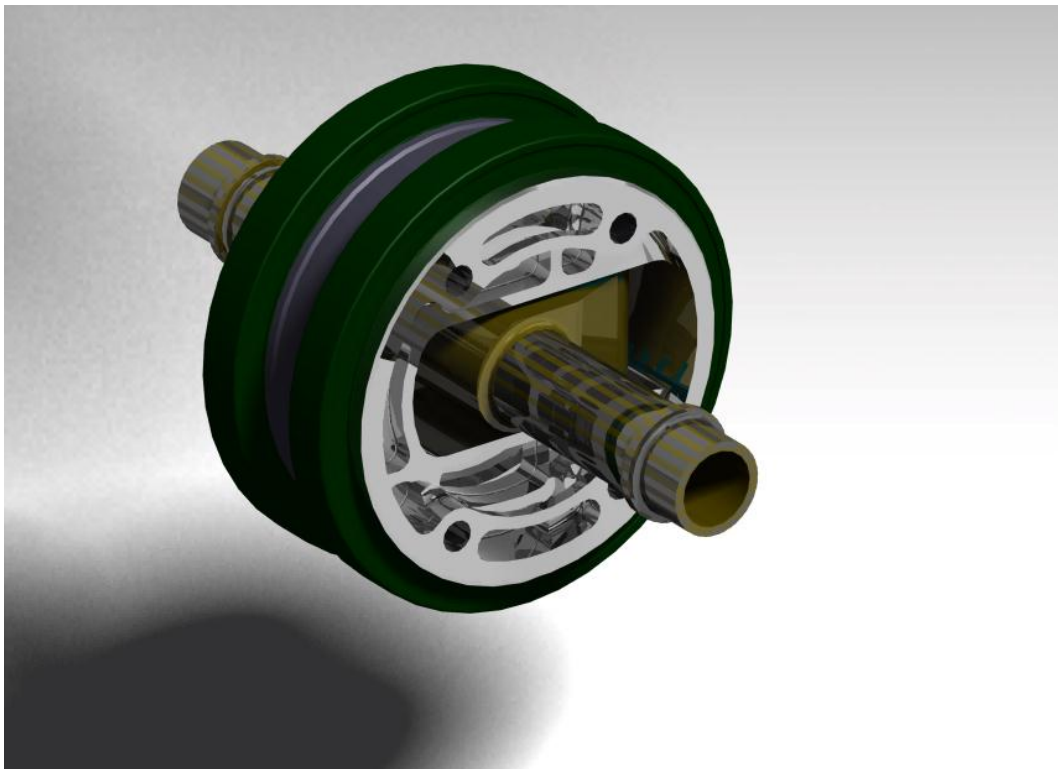


Figura 7.3: Conjunto eje-buje.

En la parte exterior este buje se montan unos rodamientos circulares sobre los que girará la rueda. Mientras que, dentro del buje, se monta el eje de dirección en forma de T. Este eje se ancla por sus extremos largos al sistema de suspensión, y permanece fijado al mismo. Buje y eje de dirección, se unen mediante rodamientos, que permiten que el conjunto rueda-buje pivote alrededor del eje de dirección. De esta manera, la tarea del resto del conjunto de dirección es lograr transmitir el par de fuerzas desde el manillar hasta el buje.

Siguiendo el camino comenzado en el eje, llegamos a la horquilla encargada de transmitir el giro a la rueda. Tal y como se puede ver en color morado en la figura 5.2, se trata de una horquilla

superpuesta a la horquilla de la suspensión, y puede pivotar en su interior. Por su parte inferior, como ya se ha explicado, va anclada al buje mediante cuatro tornillos, mientras que, en su parte superior está unida a la suspensión mediante un eje montado sobre rodamientos, lo que la permite rotar pero impide el resto de movimientos. Esto significa que, durante el trabajo de la suspensión, esta pieza se mueve solidaria con la horquilla.

Como se explica en detalle más adelante, esta pieza es la encargada de soportar las esfuerzos de frenada, que se transmiten directamente desde los soportes de las pinzas de freno, dando lugar a una reacción sobre el apoyo de la parte superior de la horquilla de la suspensión. Esto provoca un momento flector sobre la pieza completa cuyos efectos se estudiarán en el apartado de análisis MEF. Además, sobre ella se ancla el amortiguador de dirección, logrando que las sacudidas de la rueda recorran la menor cantidad posible de elementos de la cadena cinemática y, además, gracias a esta ubicación se baja el centro de gravedad.

La siguiente pieza en la cadena cinemática de la columna de dirección, supone otro de los elementos clave del funcionamiento de la misma. Como ya se ha explicado, debido al uso del doble brazo oscilante en la suspensión, el movimiento de la suspensión no está perfectamente alineado con el movimiento de las botellas telescópicas, de manera que es necesario el uso de una rótula entre ambos elementos.

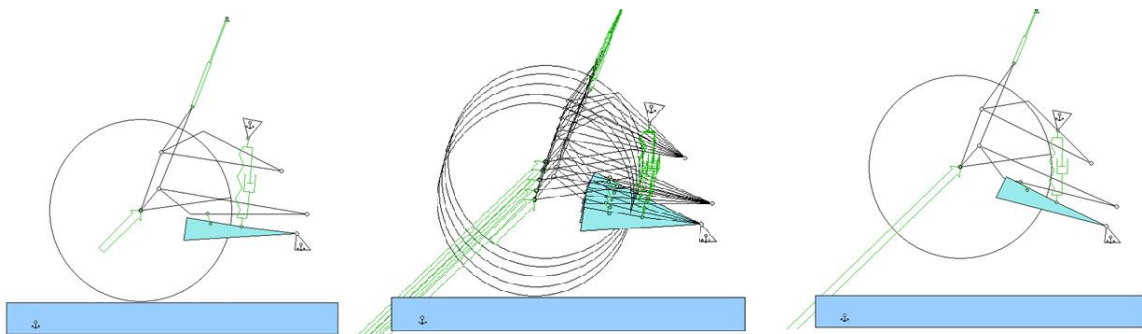


Figura 7.4: Esquema del funcionamiento de la suspensión.

Sin embargo ¿Cómo se puede transmitir un par de fuerzas a través de una unión con rótula? Una posible solución sería el uso de una unión tipo tijera, al estilo de la usada en la dirección de la Demonstener o la Elf-3. Sin embargo, se optó por una solución innovadora, sustituyendo el mecanismo de la unión de tijera por una única pieza con la posibilidad de flexar.

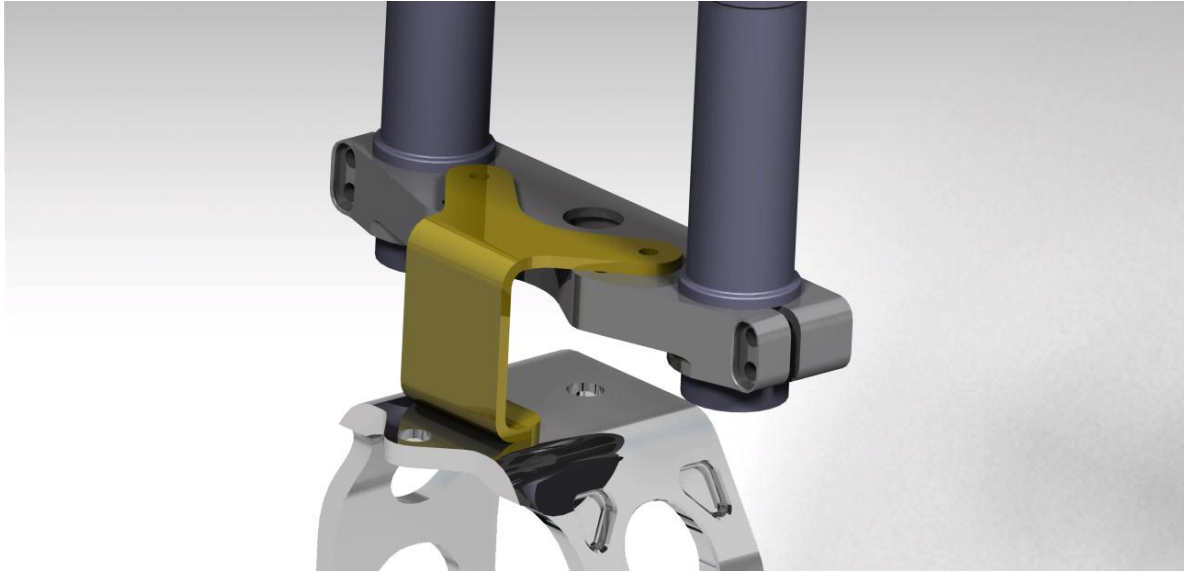


Figura 7.5: Detalle de la pieza usada para transmitir los esfuerzos de dirección.

La pieza se ha diseñado para resultar rígida ante los esfuerzos a cortadura siendo flexible ante los esfuerzos a flexión. De esta manera, tal y como se puede ver en la figura 7.5, cuando se produce un par de fuerzas en los semimanillares, este produce un esfuerzo cortante sobre la pletina de dirección, por lo que se transfiere completamente desde las botellas telescópicas hasta la horquilla de dirección. Sin embargo, cuando la suspensión está trabajando y se produce un giro relativo entre la tija inferior y la horquilla de la suspensión, esta pletina sufre un esfuerzo flector, al que apenas ofrece resistencia. De esta manera, la pieza flexa y permite que la suspensión trabaje correctamente. En parte, esto pudo realizarse gracias al cuidado diseño del recorrido de la suspensión que únicamente producía una flexión sobre la pieza de 2.5° .

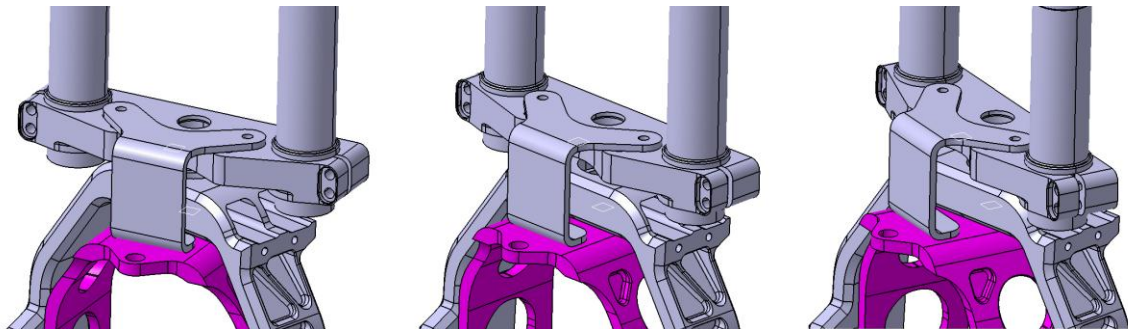


Figura 7.6: Detalle del giro del sistema de dirección.

Como se puede ver en la figura 7.6, la horquilla de la suspensión se mantiene fija cuando los elementos de la dirección giran. Gracias a esta pletina, el par de fuerzas de la dirección puede sortear la suspensión en su camino a lo largo de la cadena cinemática, todo ello evitando el uso de cualquier mecanismo, por lo que se ahorra un gran peso, se reduce el momento de inercia alrededor del eje de la dirección, y se simplifica el mecanismo de la dirección.

Si se continúa subiendo a lo largo de la columna se encuentra el sistema de horquillas telescópicas mediante el que se transmite el par de dirección hasta la pletina flexible. El gran logro de este mecanismo es conseguir transmitir el par de dirección, absorber el movimiento relativo entre

suspensión y pipa de dirección, permitir espacio al air-box y servir como unión física entre el piloto y la rueda. En su concepción, se trata de un sistema muy sencillo que consiste en dos barras telescópicas unidas por dos tijas con muelles en su interior.

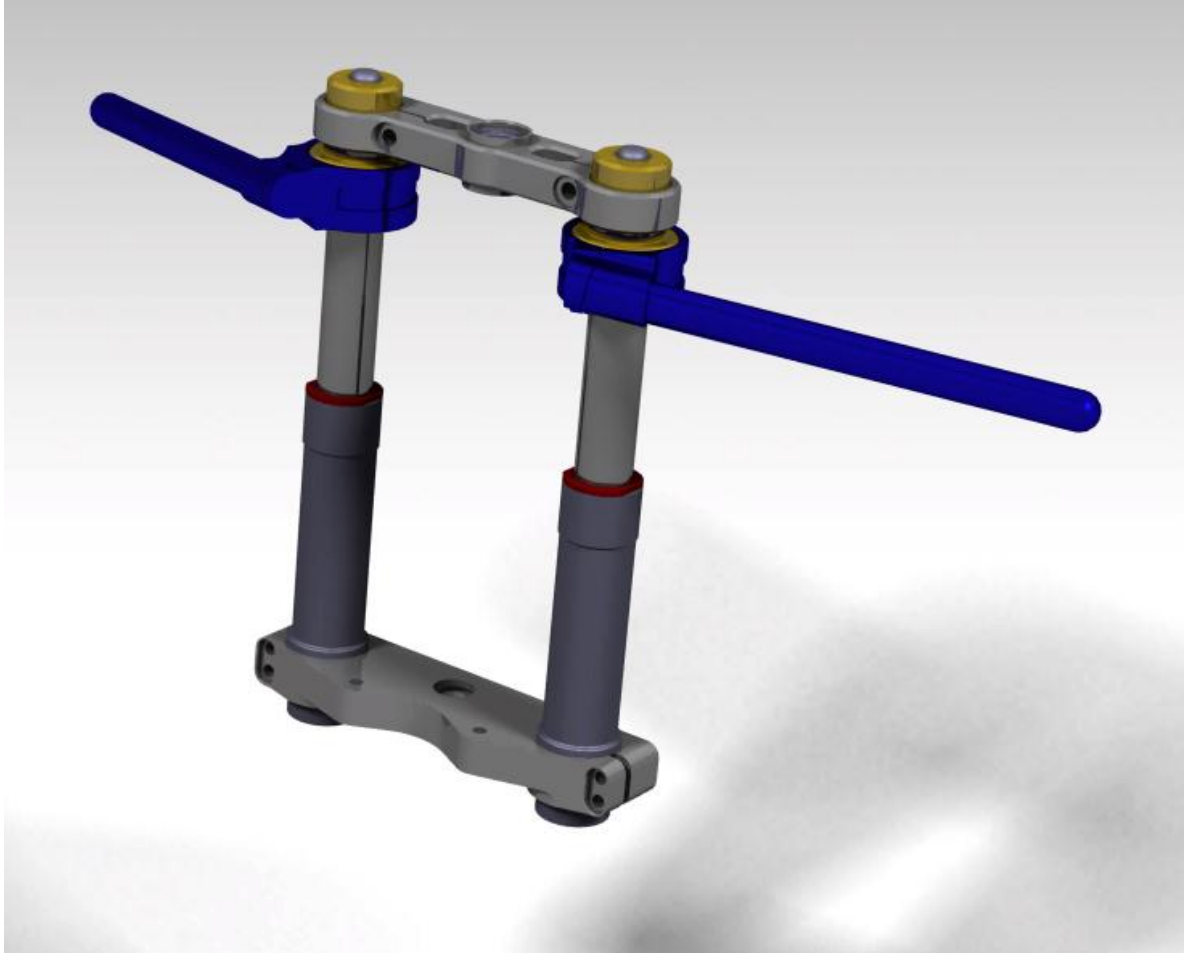


Figura 7.7: Conjunto de botellas telescópicas.

La tija inferior está sólidamente unida a las barras, y se ancla al sistema de suspensión mediante una rótula, y al sistema de dirección mediante la pletina flexible anteriormente comentada. Gracias a esta doble unión, los esfuerzos provenientes de ambos sistemas viajan por este mecanismo hasta las manos del piloto. El objetivo de introducir muelles dentro de las barras telescópicas no tiene que ver con el trabajo de la suspensión, solamente supone un medio para lograr que las vibraciones a las que dé lugar el trabajo de la suspensión se transmitan hasta las manos del piloto igual que ocurriría con una motocicleta con horquilla convencional.

A la hora de plantear el anclaje de la tija superior al subchasis, se planteaba el problema del pequeño movimiento de rotación que describen las barras telescópicas respecto al subchasis durante el trabajo de la suspensión delantera, lo que hacía necesario introducir unas rótulas que permitiesen esa rotación relativa, al igual que ocurre en la suspensión Paralever de BMW (figura 3.9). Si no se introdujesen estas rótulas los semimanillares también se moverían respecto al piloto (quien, hasta cierto punto, se puede considerar como un elemento “anclado” al chasis). Este

movimiento de los manillares no es bien recibido por el piloto, de manera que se hace necesario introducir las rótulas en otro punto que no perjudique las sensaciones del piloto. Para ello, se decidió anclar la tija al subchasis de la forma tradicional, mediante un eje montado sobre unos rodamientos, e introducir las rótulas entre la tija y la parte superior de las botellas. De esta manera, para montar los semimanillares, se hizo uso de unos casquillos solidarios a la tija. Con ello se consigue que los semimanillares no pivoten cuando trabaja la suspensión, otorgando al piloto las mismas sensaciones que con una horquilla normal.

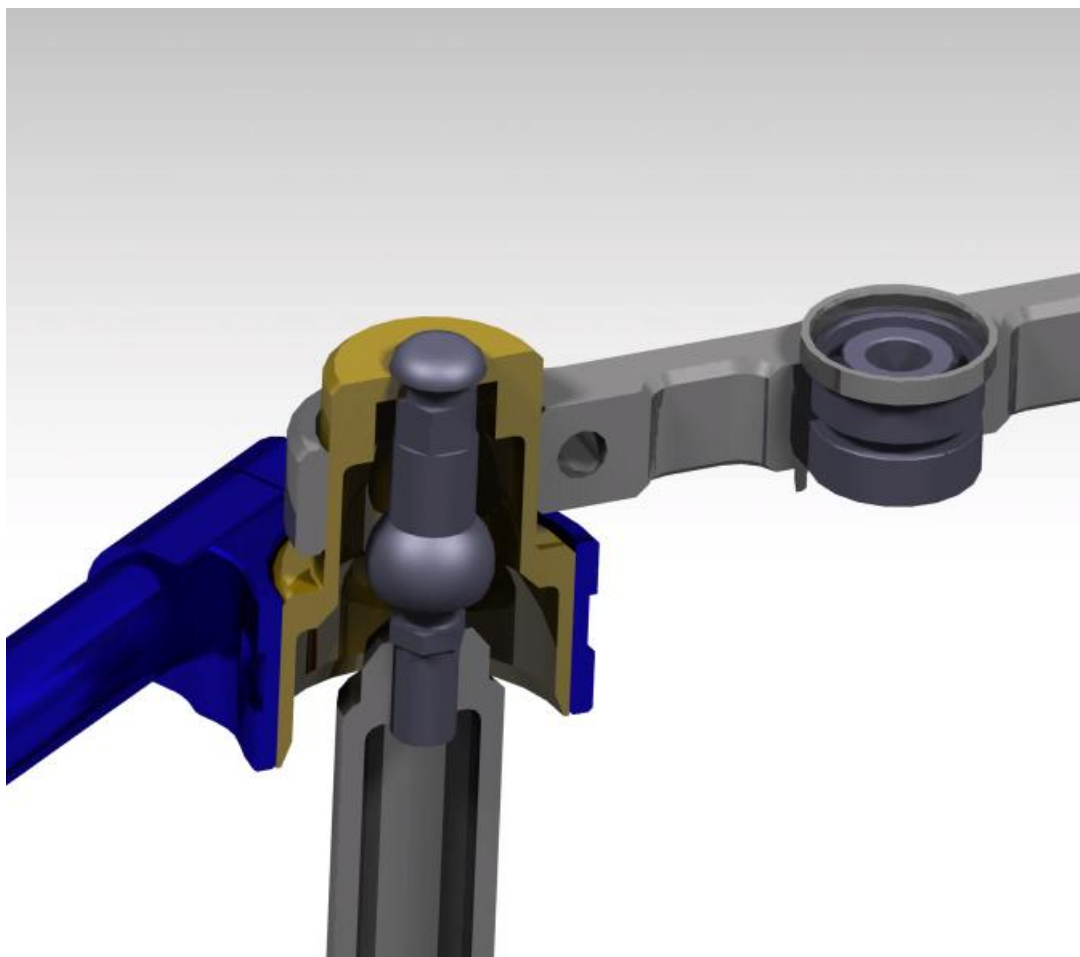


Figura 7.8: Corte del alojamiento de las rótulas usadas en el conjunto MT2-DI-00-00.

Por otro lado, gracias al uso de dos botellas telescópicas en vez de una, se permite el paso directo de aire hacia el air-box, como se puede apreciar en la figura 7.9. Desde el punto de vista del peso, la reducción del número de piezas y del momento de inercia de la columna de dirección, resultaba más interesante decantarse por una sola barra al estilo de la Demonstener D1200RR. Sin embargo, la ganancia en peso que ofrecía un sistema de una sola botella, se ha considerado menor que la pérdida en potencia provocada por no tener una entrada directa al air-box.

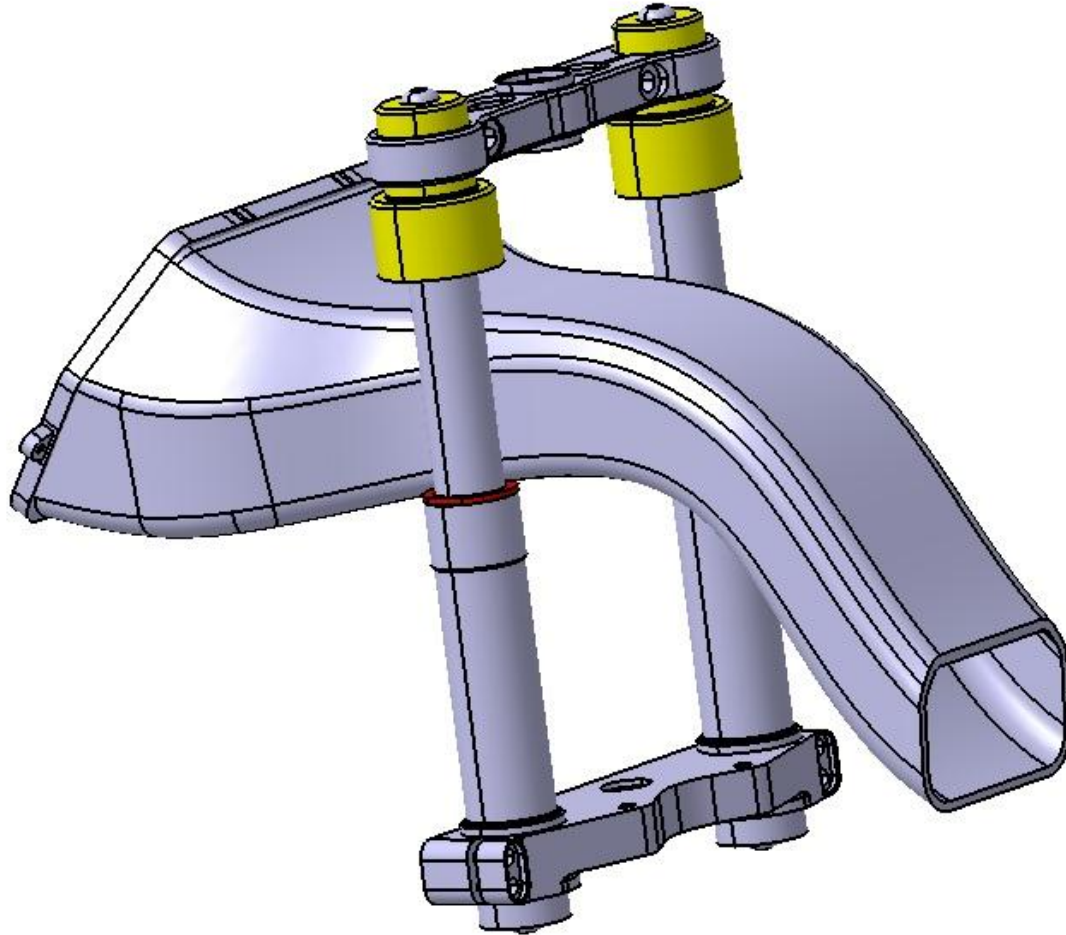


Figura 7.9: Entrada al air-box

El último elemento de la cadena cinemática es el eje de que une la tija y el subchasis. La principal particularidad de este eje es que, al contrario que en las motocicletas equipadas con horquilla convencional, no tiene que soportar los esfuerzos del trabajo de la suspensión, sino que únicamente debe ser capaz de lidiar con las cargas que el piloto ejerce sobre el manillar durante el pilotaje. Además, tal y como se explicará con más detalle en el capítulo de reglajes de la dirección, el eje no va montado sobre una pipa con un alojamiento normal, si no que va montado sobre un alojamiento alargado, de tal manera que el paquete pueda deslizarse, y haga posible colocar el eje de dirección en distintas posiciones.

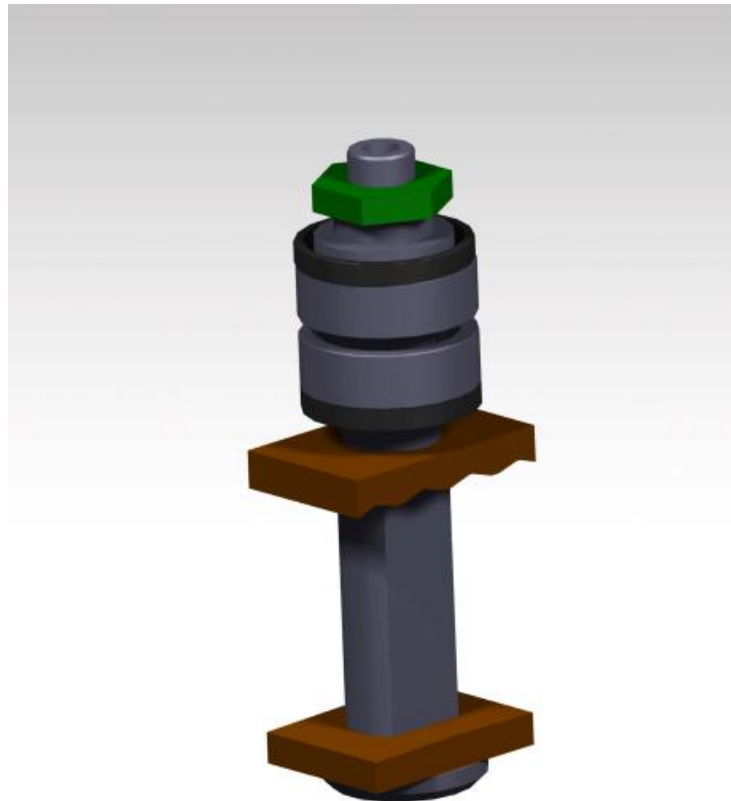


Figura 7.10: Conjunto de la pipa de dirección.

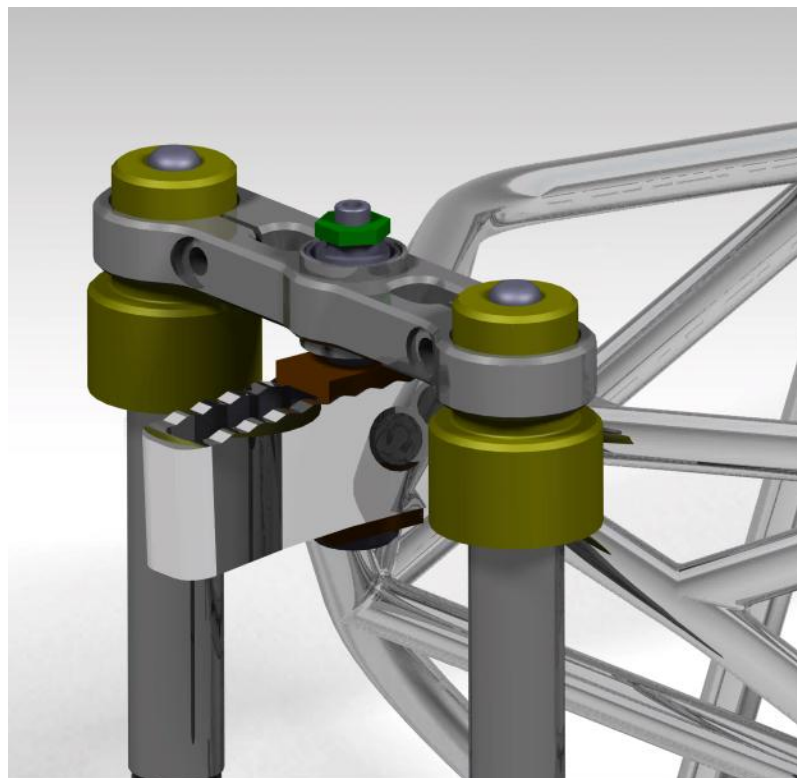


Figura 7.11: sistema de dirección instalado sobre el subchasis delantero.

Debido a la ausencia de esfuerzos provenientes del trabajo de la dirección, uno de los problemas que encontramos al diseñar esta parte de la motocicleta fue el desconocimiento de las fuerzas que ejerce un piloto sobre la suspensión. En las habituales suspensiones por horquillas, los esfuerzos debidos a la frenada o a los baches son mucho más importantes que los realizados por el piloto, de manera que, usando componentes estándar, estaríamos sobredimensionando esa zona y añadiendo un peso innecesario. Por ello, para ajustar el peso del conjunto al mínimo, se realizaron una serie de mediciones con equipos de extensometría de los esfuerzos que un piloto ejerce sobre la dirección durante una vuelta a un circuito. Gracias a los datos obtenidos, ha sido posible diseñar los elementos de manera mucho más precisa. Estos experimentos serán explicados más adelante.

Una vez conocido el funcionamiento básico de la columna de dirección y el propósito y funcionamiento de cada uno de sus elementos, en los siguientes apartados se explica con todo detalle el diseño de cada una de las piezas, junto con las simulaciones realizadas, sus cálculos y las justificaciones del diseño final.

7.2. GEOMETRÍA DE LA SUSPENSIÓN

Uno de los objetivos del proyecto era lograr una geometría de dirección similar a una motocicleta estándar. Uno de los modelos de referencia en el campeonato CEV Buckler es la Honda CBR 600 RR. Este es el modelo del que se obtiene el motor. Además, presenta unas buenas capacidades dinámicas, por lo que naturalmente, se tiende a asimilar las motocicletas producidas a éste modelo comercial. En la tabla 7.1 se presenta una comparación entre las geometrías de LaMoto2 y la Honda CBR 600 RR:

Tabla 7.1: Comparación entre las geometrías de LaMoto2 y la Honda CBR 600.

	LaMoto2	CBR 600 RR
Avance	90mm	98 mm
Lanzamiento	22°	23° 55'
Distancia entre ejes	1402mm	1375 mm

Como se puede ver, el diseño de la dirección y suspensión conforma una motocicleta con unas geometrías más agresivas incluso que la CBR 600 RR. A priori, esto le permitirá ser más ágil y manejable, lo que le permitirá tener un buen comportamiento en la pista.

7.3. BUJE (MT2-DI-04-00)

El conjunto MT2-DI-04-00 está formado por el buje, el eje de dirección y los rodamientos que unen ambos.

Uno de los principales retos que planteó la realización del diseño del conjunto del buje provenía de los rodamientos mediante los que éste se une a la llanta. Resultaba de vital importancia usar un conjunto de rodamientos comerciales, de los que se pudiera disponer de forma inmediata sin la necesidad de esperar largos tiempos de fabricación que pudieran retrasar el proyecto. Esto obligó a realizar un estudio detallado de los rodamientos que ofrecía el mercado para lograr escoger la

opción más conveniente.

- **Buje (MT2-DI-04-01).**

Debido a la necesidad de usar rodamientos comerciales, el diseño sufrió varias evoluciones según se iban planteando alternativas en la elección de los mismos.

En un principio el diseño de los rodamientos planteados producía unas cargas en el buje que se llegó a barajar la idea de realizar la pieza en acero (figura 7.12).

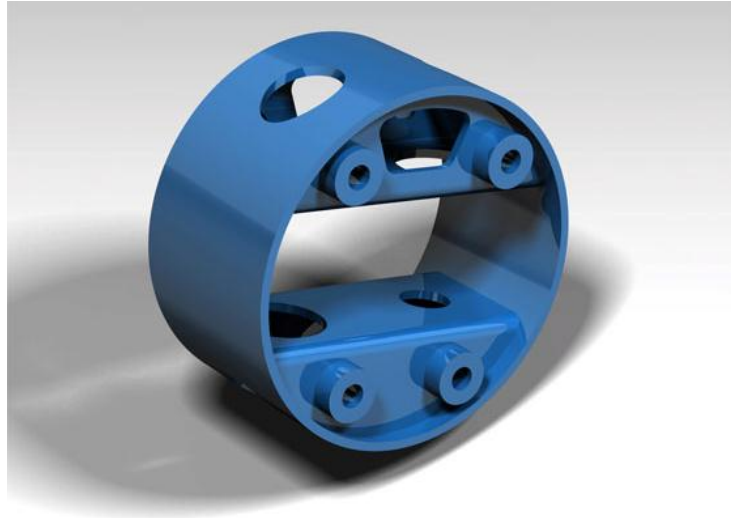


Figura 7.12: Muestra de uno de los bujes desechados. Este diseño estaba planteado para ser fabricado en hierro, partiendo de un tubo de grandes dimensiones y dos planchas cortadas por láser, dobladas y soldadas al tubo.

Sin embargo, tras una profunda revisión de las alternativas comerciales a esos rodamientos, se encontró otro modelo (SKF 61824-2RZ) que permitía distribuir mejor las cargas sobre el buje. Gracias a ello se pudo realizar un buje mecanizado en un solo bloque de aluminio.

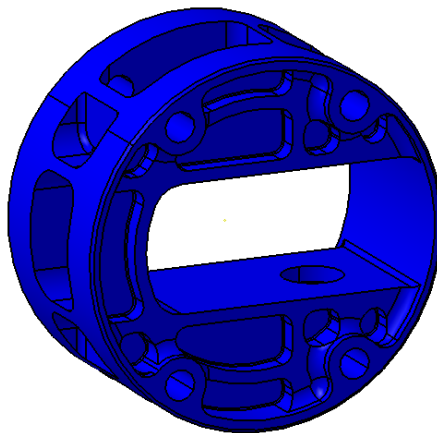


Figura 7.13: Diseño final del buje MT2-DI-04-01.

De esta forma, el buje se mecaniza en un centro de tres ejes, usando cinco agarres distintos. Primero se mecanizan las dos caras planas y los agujeros pasantes (figura 7.14). En la tercera, cuarta y quinta fase, se realizan tres mecanizados en direcciones perpendiculares al eje de revolución del buje, tal y como se aprecia en el corte de la piza (figura 7.15).

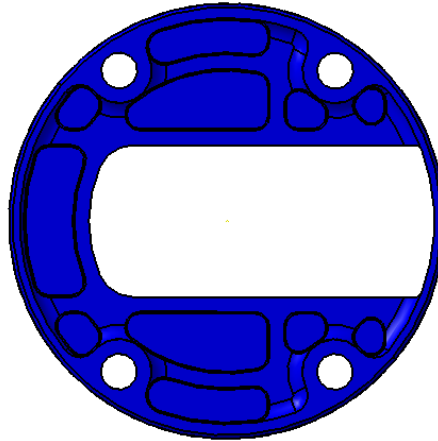


Figura 7.14: Durante la primera y la segunda fase del mecanizado del buje se realizan los agujeros pasantes y se mecanizan las dos caras planas como la que aparece en esta imagen.

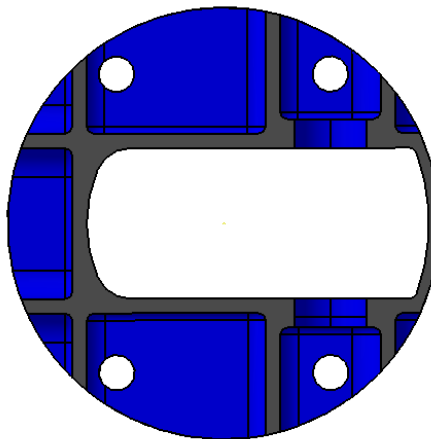


Figura 7.15: Detalle del corte del buje. Se puede apreciar la necesidad de mecanizar desde tres direcciones distintas para lograr realizar todos los vaciados.

El buje tiene una función primordial en la geometría de la motocicleta ya que el eje de dirección se encuentra en su interior. De esta forma, la posición en el espacio del buje define todos los parámetros dependientes del eje de dirección. Es por ello que estos parámetros se pueden controlar variando la posición de los anclajes del buje. Tal y como se puede ver en la figura 7.16, en su posición original el eje de dirección forma 22° con la horizontal.

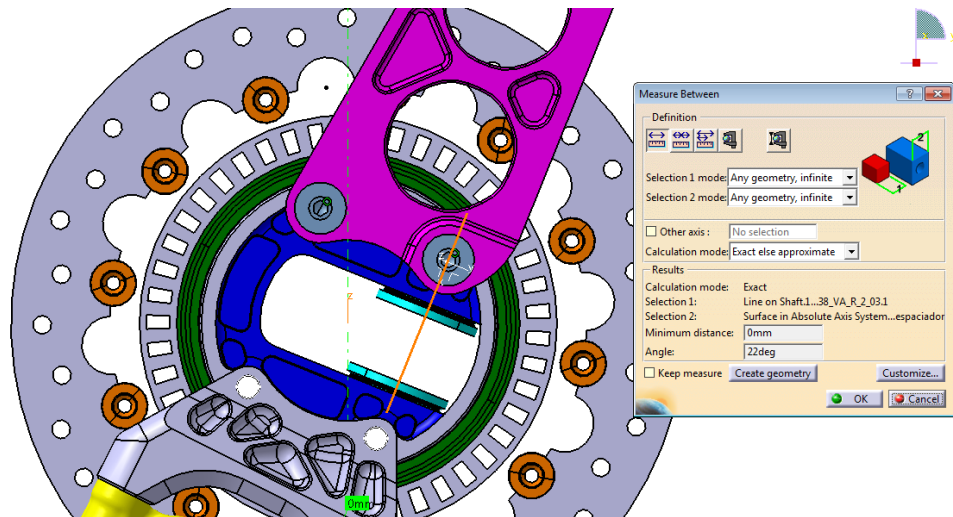


Figura 7.16 : Ángulo de lanzamiento del eje de la dirección. Como se puede observar, este ángulo viene definido por la posición en el espacio del buje. Por tanto, depende completamente de los puntos de anclaje del buje.

- Rodamientos de dirección (SKF AXW 20 con arandela LS 2035)**

Estos rodamientos son los encargados de permitir un giro de la dirección alrededor del eje de dirección sin rozamientos que impidan el suave funcionamiento del mecanismo.

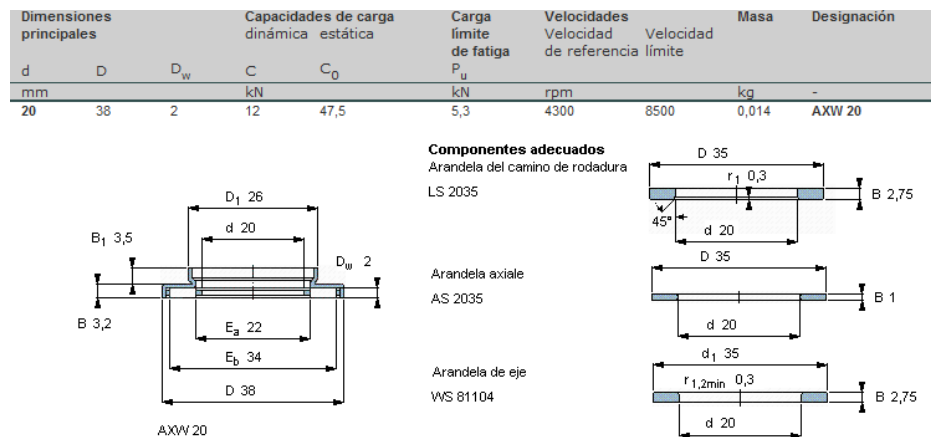


Figura 7.17: Características de los rodamientos SKF AXW 20.

- Eje de dirección.**

A pesar de su nombre, el eje de dirección no forma parte del conjunto de dirección, ya que, tanto su movimiento como los esfuerzos que soporta atienden completamente al trabajo de la suspensión. Es por ello que su funcionamiento se ha explicado para comprender la motocicleta, pero su diseño no será tenido en cuenta en este apartado.

7.4. CONJUNTO HORQUILLA DE DIRECCIÓN (MT2-DI-03-00)

Tal y como ya se ha visto, el movimiento de la dirección, llega hasta el buje a través de una horquilla vertical que enlaza el conjunto del buje y el conjunto de las barras telescópicas. El

principal cometido de este subconjunto es llevar el par aplicado sobre la dirección desde la pletina flexible hasta el buje. Además, es en este punto donde se amortiguan las fuerzas y sacudidas que se producen en la rueda gracias al amortiguador de dirección.

Sin embargo, las mayores fuerzas que tiene que soportar este conjunto no provienen del funcionamiento de la dirección, si no del sistema de frenado, por lo que durante su diseño ha sido muy importante tener esto en cuenta, como se verá más adelante.

- **Horquilla de dirección (MT2-DI-03-01).**

Se trata de una pletina mecanizada en aluminio que se encuentra superpuesta a la horquilla de la suspensión y que gira en su interior con el movimiento de la dirección.

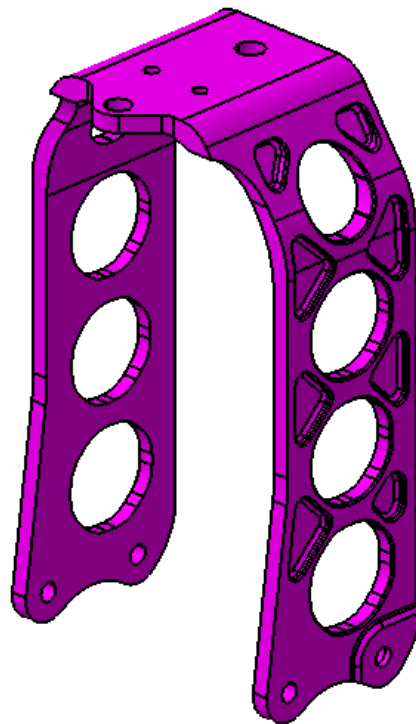


Figura 7.18: Diseño final de la horquilla de dirección MT2-DI-03-01.

En su parte superior está unida a la placa flexible, la cual le transmite el par de la dirección desde la tija inferior.

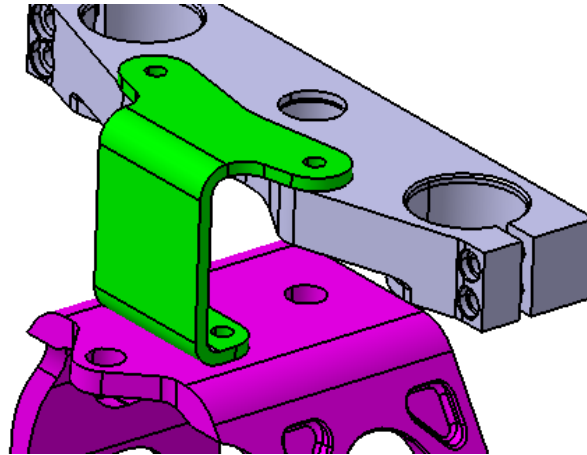


Figura 7.19: Unión entre la horquilla de dirección y la tija inferior mediante la pletina de dirección.

También en la parte superior de la horquilla de dirección existe un eje que hace las veces de unión entre el sistema de dirección y el de suspensión. Mientras que la placa flexible es la encargada de transmitir el par de fuerzas de la dirección, este eje se encarga de establecer un punto alrededor del que el sistema pivote.

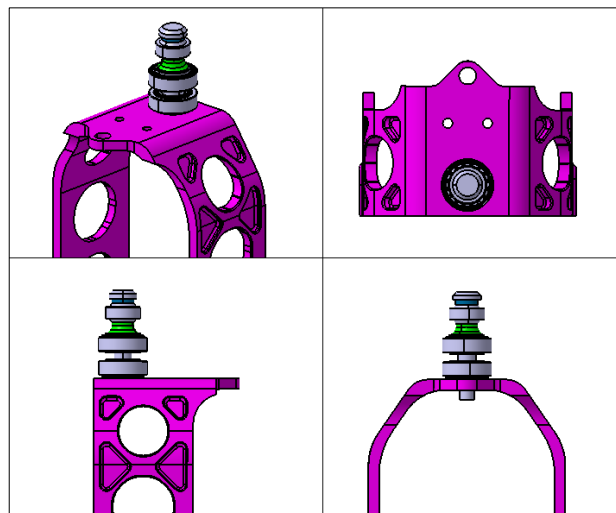


Figura 7.20: Vistas del eje sobre el que pivota la horquilla de dirección.

Con este único eje se logran unir la horquilla de dirección, con la horquilla de suspensión y la tija inferior.

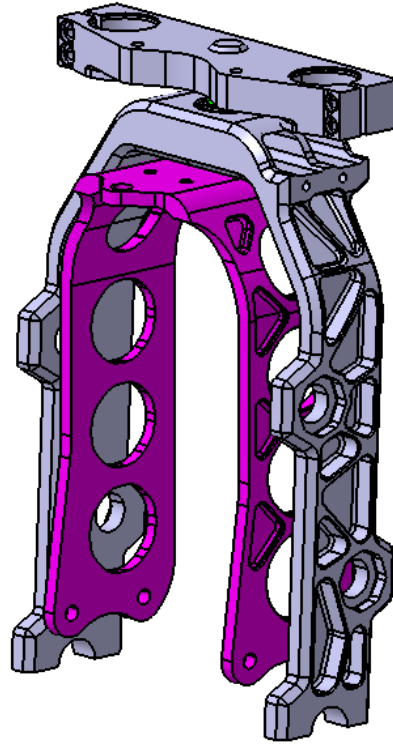


Figura 7.21: Horquilla de dirección presentada sobre la horquilla de suspensión.

La unión entre eje y horquilla de suspensión se realiza mediante unos rodamientos que permiten el giro relativo entre ambas horquillas de suspensión y dirección. Mientras que la unión entre el eje y la tija inferior (MT2-DI-00-02) se realiza mediante una rótula que permite el pivotamiento necesario entre tija y suspensión para que el mecanismo funcione.

En la figura 7.22, se puede ver un detalle del corte de este sistema. En amarillo aparece representado el eje; en morado, la horquilla de dirección; en gris, los rodamientos y la tija inferior; en marrón claro, la horquilla de suspensión y, en verde, el casquillo separador entre rodamientos y tija.

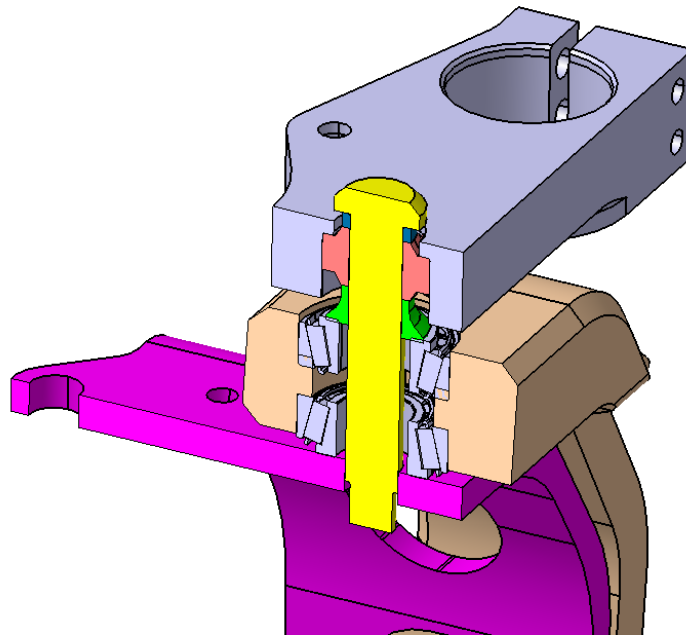


Figura 7.22: Corte del mecanismo de unión entre sistema de dirección y sistema de suspensión.

Gracias a este sistema se logra que la tija pueda pivotar un ángulo de 11.114° con respecto al sistema de suspensión.

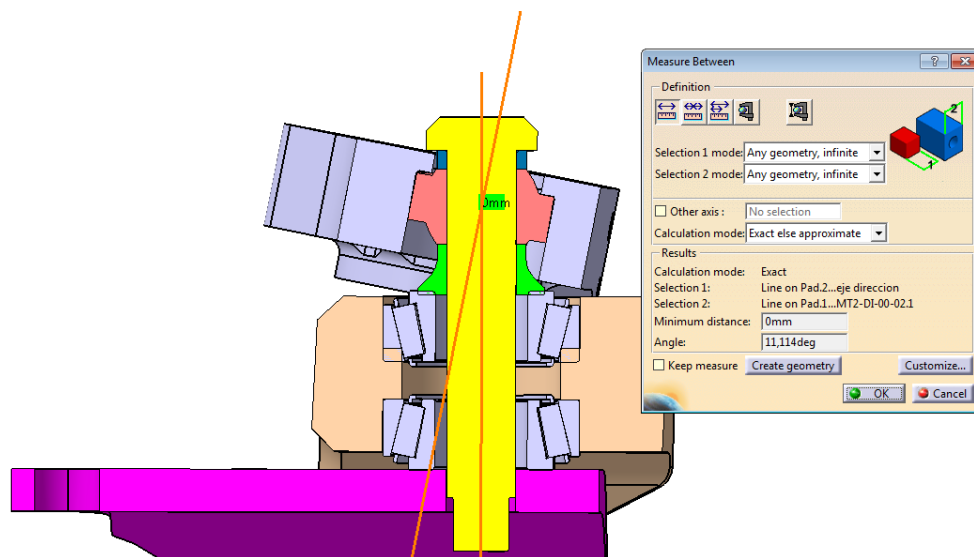


Figura 7.23: Máximo pivotamiento posible de la tija inferior: 11.114° .

Por su parte inferior, la horquilla de dirección está unida de manera completamente rígida al buje de la rueda, de manera que pueda trasladar sin ninguna holgura los movimientos de la dirección.

Para realizar esta unión se ha atornillado la horquilla al buje, sin embargo, debido al reducido tamaño del buje, ha sido necesario recurrir a unos separadores entre la horquilla de

dirección y el buje.

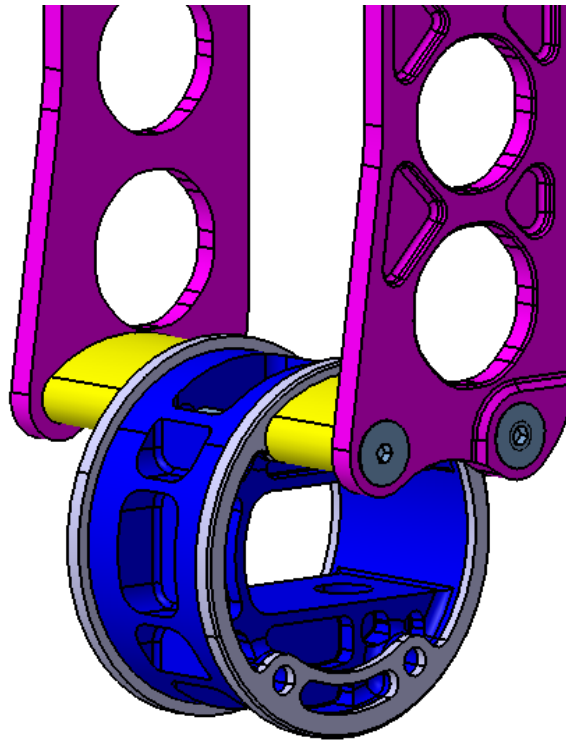


Figura 7.24: Unión entre la horquilla de dirección y el buje.

- **Rodamientos eje (SKF 32004 X/Q).**

Para la unión entre la horquilla de dirección y la horquilla de suspensión se han utilizado unos rodamientos de rodillos cónicos modelo 32004 X/Q de la empresa SKF con las siguientes características:

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades	Velocidad	Masa	Designación
d	D	T	C	C ₀	P _u	Velocidad de referencia	límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
20	42	15	24,2	27	2,7	12000	16000	0,097	32004 X/Q

Factores de cálculo
e 0,37
Y 1,6
Y₀ 0,9

Figura 7.25: Características de los rodamientos SKF 32004 X/Q

- **Rótula eje (SKF GEH 15 C)**

Para la unión entre eje y tija inferior, se ha recurrido de nuevo a la marca SKF, en concreto a su modelo de rótula GEH 15 C. Esta rótula tiene las siguientes características:

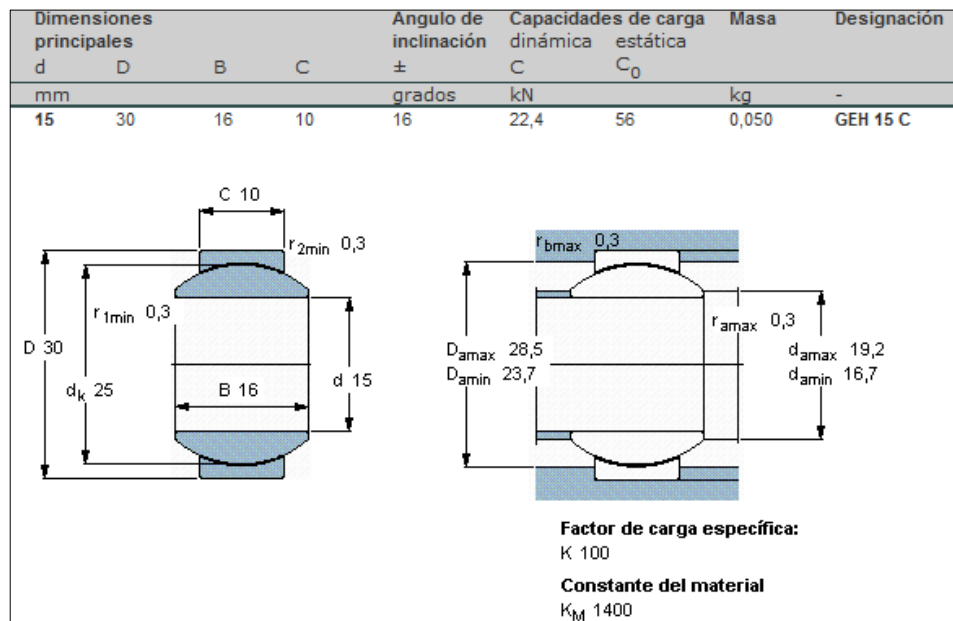


Figura 7.26: Características de la rótula SKF GEH 15 C

Tal y como se puede ver en la figura 7.26, permite un ángulo de inclinación de 16° mientras que el sistema solo requiere 2° , por lo que la rótula cumple perfectamente con su cometido.

- **Amortiguador de dirección.**

Con el fin de amortiguar las sacudidas que puedan producirse en la rueda, y que hagan peligrar la estabilidad de la moto en caso de perdurar en el tiempo, se ha instalado un amortiguador de dirección de la marca Öhlins.



Figura 7.27: Amortiguador de dirección cedido por Öhlins.

Para lograr que esas fuerzas recorran la menor parte de la cadena cinemática de la dirección, el amortiguador de dirección se ha colocado sobre la horquilla de dirección y se ha unido a la horquilla de la suspensión que, como ya se ha explicado, no pivota con la dirección, está fija.

Además, gracias a esta ubicación, también se contribuye a bajar el centro de gravedad del conjunto.

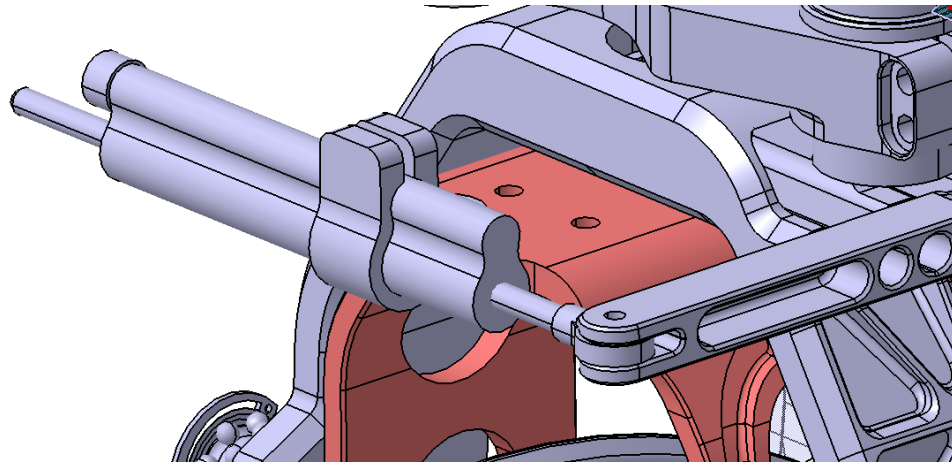


Figura 7.28: Esquema de montaje del amortiguador de dirección.

Hay que tener en cuenta que el amortiguador de dirección puede llegar a ejercer unas fuerzas considerables, y su anclaje está muy cerca del borde de la pieza, por lo que será necesario hacer un análisis de elementos finitos detallado de los esfuerzos que sufre esta zona.

- **Sistema de frenado y sus efectos sobre la placa salmón.**

Una de las principales características de esta pieza es que soporta los esfuerzos de frenada. Aunque, a priori no es un cometido del sistema de dirección, la motocicleta se planteó desde el principio con esta característica, y es imposible obviarla de cara a un correcto diseño y dimensionamiento de las piezas.

En el apartado sobre los bujes que heredan el sistema diseñado por Jack Difazio, se explicó que este tipo de bujes no soportan el par de fuerzas que producen las pinzas de freno, de manera que tienen que soportarla otros elementos. Algunas motocicletas como la Bimota Tesi recurren a tirantes anclados al chasis (figura 3.18), sin embargo, LaMoto2 soporta estos esfuerzos transmitiéndolos a la horquilla de dirección.

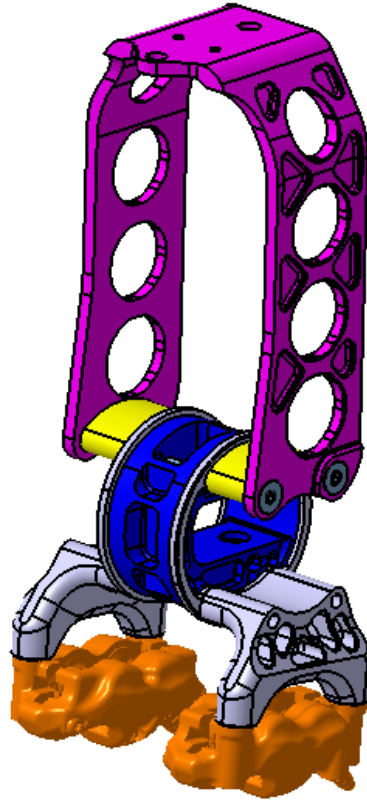


Figura 7.29: Sistema de frenado montado sobre el buje.

Como se puede ver en la figura 7.30, el buje cuya rotación alrededor del eje de la rueda no está restringida, transmite directamente los esfuerzos desde los soportes de las pinzas hasta la pletina de dirección, que está anclada por su parte superior al sistema de suspensión que es, en última instancia el encargado de transmitir esos esfuerzos hasta el chasis de la motocicleta.

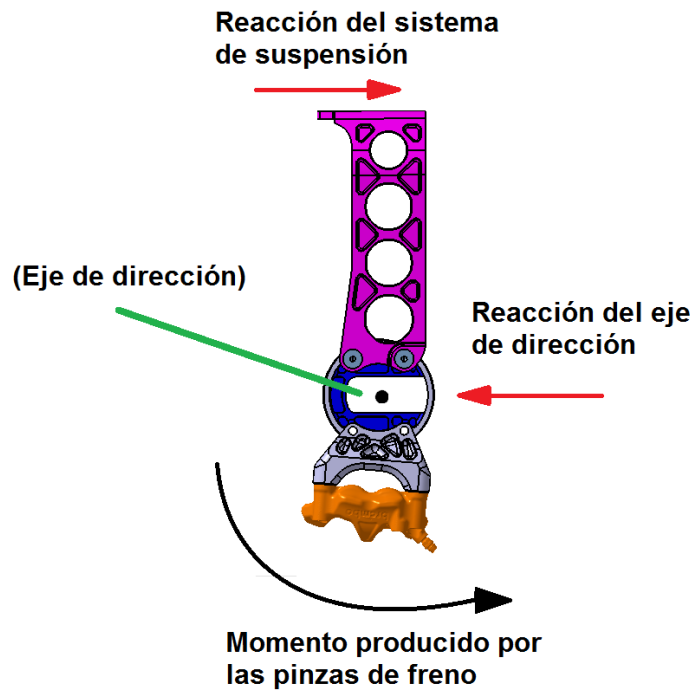


Figura 7.30: Esquema de fuerzas soportadas por la horquilla de dirección.

La empresa italiana Brembo es patrocinador del campeonato CEV Buckler, y todas las motocicletas de la categoría Moto2 equipan su modelo GP4 RR. Según datos de Brembo, el sistema delantero al completo, arroja un momento alrededor del eje de la rueda de 600 N·m. Este dato será usado en los análisis MEF para comprobar la resistencia de la horquilla de dirección.



Figura 7.31: Pinzas de freno cedidas por Brembo.

7.5. PLETINA DE DIRECCIÓN (MT2-DI-02-01).

Como ya se ha mencionado, una de las claves del diseño de la dirección de LaMoto2 está en la concepción de la pletina de dirección. Se trata de una pieza realmente sencilla, pero que cumple una importante función.

Debido al giro relativo entre las horquillas telescópicas (conjunto MT2-DI-00-00) y la horquilla de dirección, se necesitaba un sistema capaz de transmitir un momento alrededor del eje de dirección y, a su vez, capaz de absorber una rotación alrededor de un eje paralelo al eje de cabeceo.

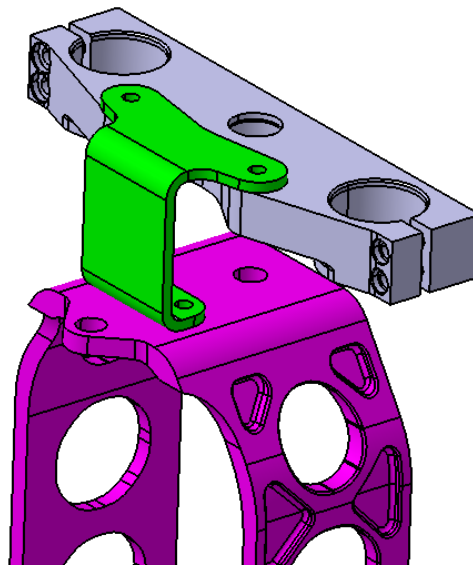


Figura 7.32: Montaje de la pletina de dirección.

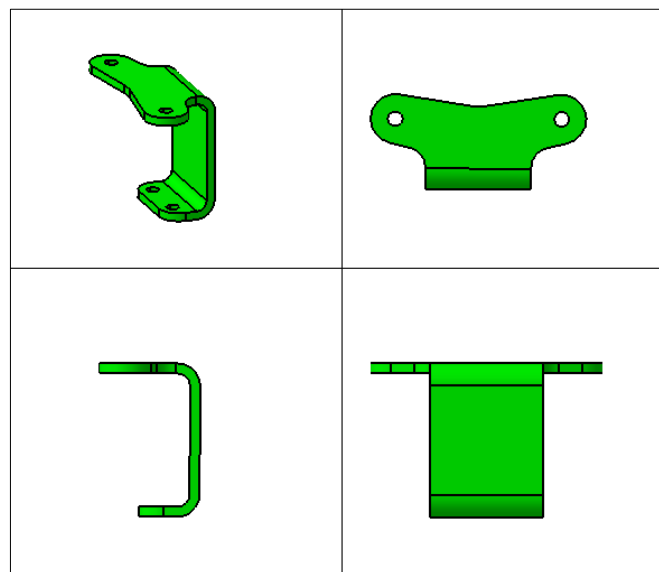


Figura 7.33: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-02-01.

De esta manera, y gracias a una sencilla pieza flexible se consigue unir ambos elementos mediante una única pieza simplificando el mecanismo, ahorrando peso, evitando fuentes de holguras etc.

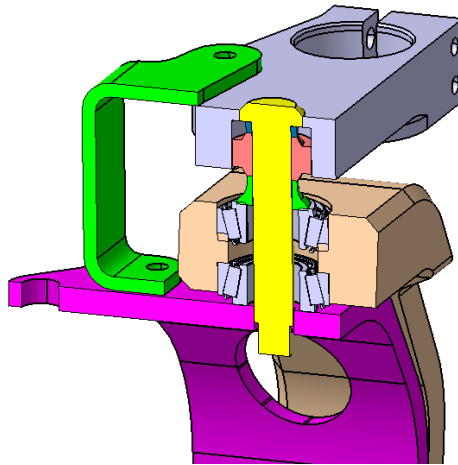


Figura 7.34: Corte del mecanismo de transmisión del par de giro.

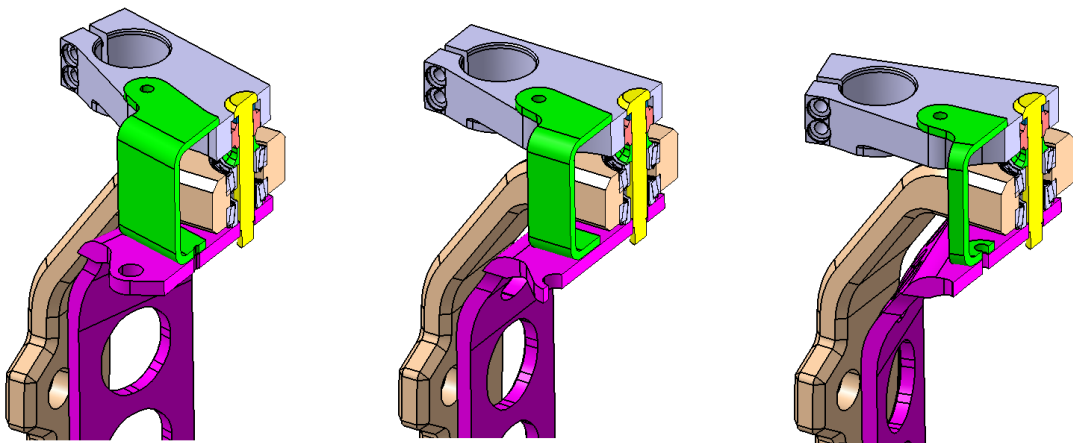


Figura 7.35: Funcionamiento del mecanismo de transmisión del giro.

7.6. CONJUNTO BARRAS TELESCÓPICAS (MT2-DI-00-00).

Como ya se explicó en el apartado 5.3, la misión de este conjunto es unir manillar y rueda, absorbiendo los movimientos relativos que se producen entre ambos, tal y como se puede ver en la figura 7.36.

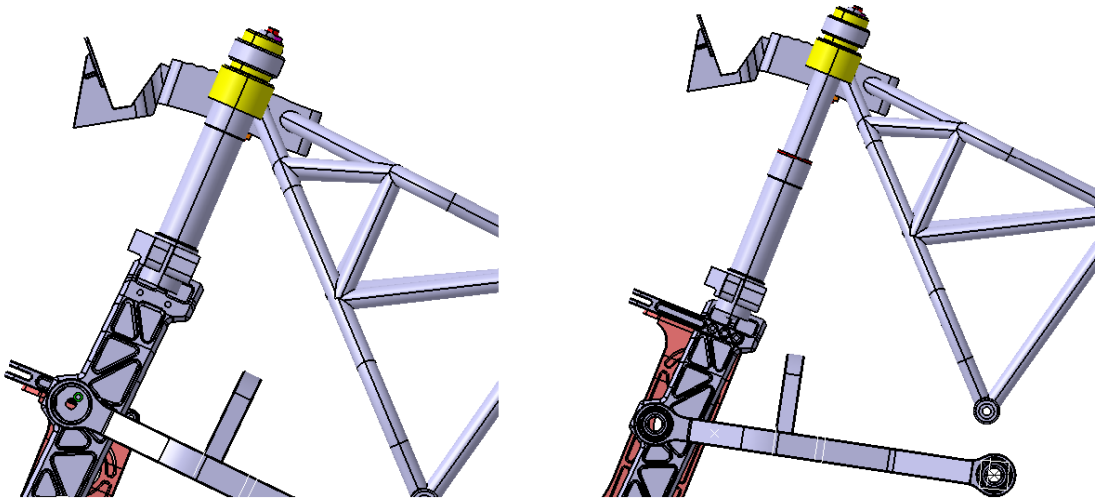


Figura 7.36: Esquema del trabajo del conjunto de botellas telescópicas durante el funcionamiento de la suspensión.

Para cumplir estas funciones, el conjunto está compuesto de los siguientes elementos:

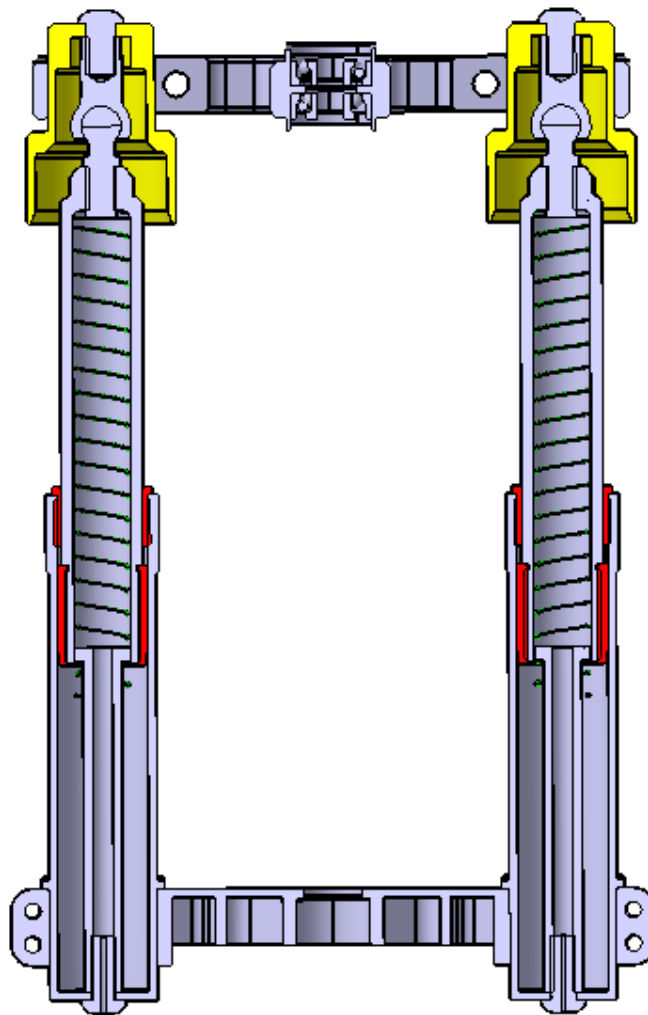


Figura 7.37: corte del conjunto MT2-DI-00-00.

- **Tija Superior (MT2-DI-00-01).**

Conforma la unión superior del conjunto. Une ambas barras telescópicas, y se apoya sobre el eje de dirección mediante unos rodamientos de bolas. El taladro central sirve de alojamiento para los rodamientos, mientras que los casquillos de los semimanillares sobre los que van montados las barras telescópicas se alojan en los dos agujeros laterales. Estos dos agujeros están abiertos en uno de sus lados para poder ajustarse perfectamente a los casquillos. Para cerrarlos, se usan dos tornillos, uno por cada casquillo.

Además, como se puede ver en la figura 7.38, tiene un vaciado pasante para aligerar el peso del conjunto.

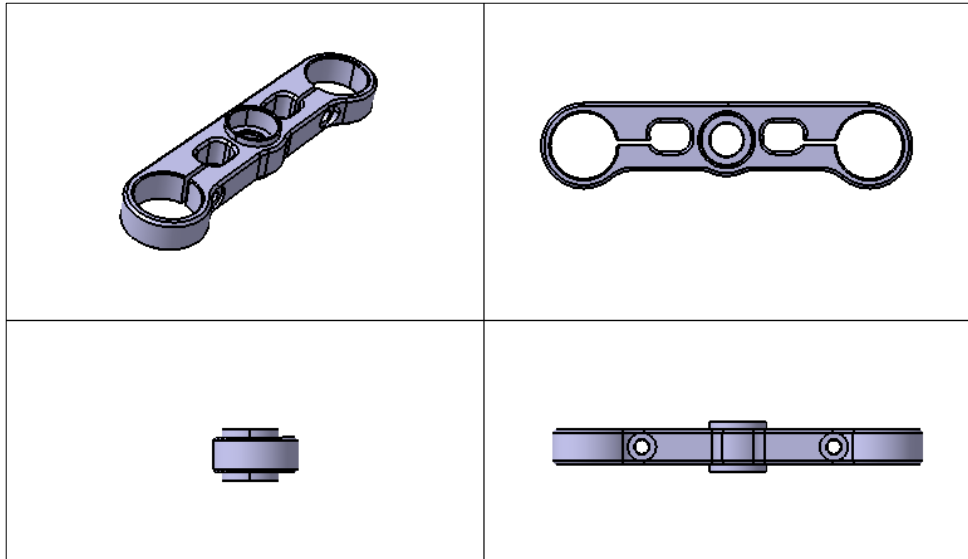
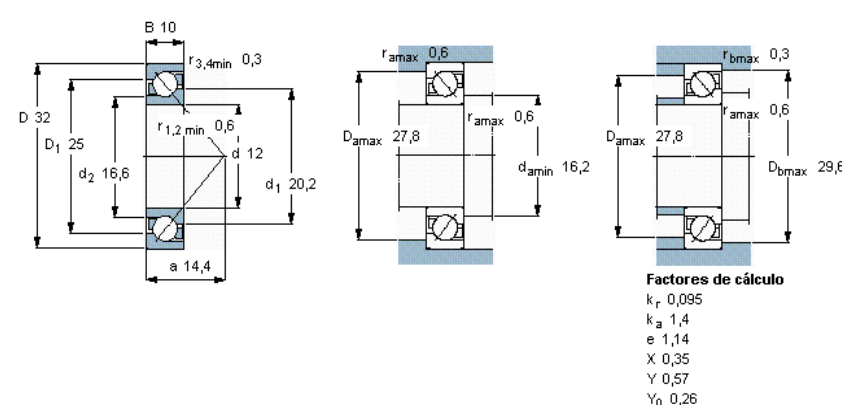


Figura 7.38: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-00-01

- **Rodamientos de dirección (SKF 7201 BECBP).**

Para montar la tija sobre el eje de dirección se han usado unos rodamientos de bolas con contacto angular de la marca SKF modelo 7201 BECBP con un diámetro del eje de 12mm y un diámetro externo de 36 mm.

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades	Velocidad	Masa	Designación
d	D	B	C	C ₀	P _u	de referencia	límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
12	32	10	7,61	3,8	0,16	26000	26000	0,036	7201 BECBP



Factores de cálculo
 k_r 0,095
 k_a 1,4
 e 1,14
 X 0,35
 Y 0,57
 Y_0 0,26

Figura 7.39: Características de los rodamientos SKF 7201 BECBP

- **Tija inferior (MT2-DI-00-02).**

Une ambas botellas en la parte inferior del conjunto y es el lugar en el que se ancla la pletina flexible y en el que se une la dirección a la suspensión. En su parte inferior tiene un vaciado, mientras que su parte superior es una superficie continua para soportar mejor los esfuerzos que se producen entre la tija y la pletina flexible.

El taladro central sirve de alojamiento para la rótula mediante la que se une con la horquilla vertical de la suspensión.

Los dos agujeros exteriores son los alojamientos de las botellas de la dirección. Se le han practicado dos ranuras en la zona exterior para poder ajustarse a las pequeñas variaciones de tamaño que tengan las botellas definitivas (defectos de fabricación, dilatación térmica...), de manera que se hace uso de un par de tornillos por cada lado para asegurar que las botellas no se moverán.

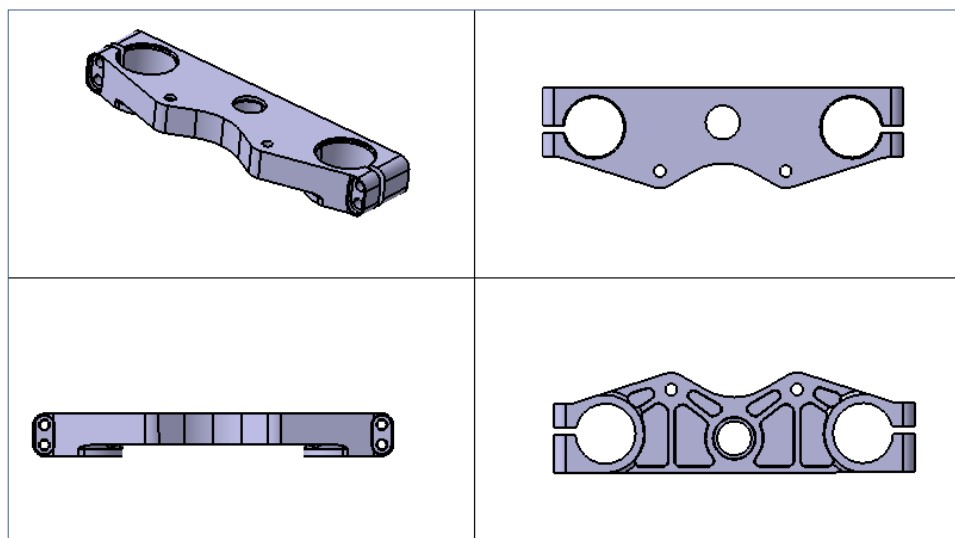


Figura 7.40: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-00-02.

- **Casquillos semimanillares (MT2-DI-00-03).**

Esta pieza se usa para un doble propósito. Por un lado a ella se anclan los semimanillares para lograr que estos no pivoten con el trabajo de la suspensión.

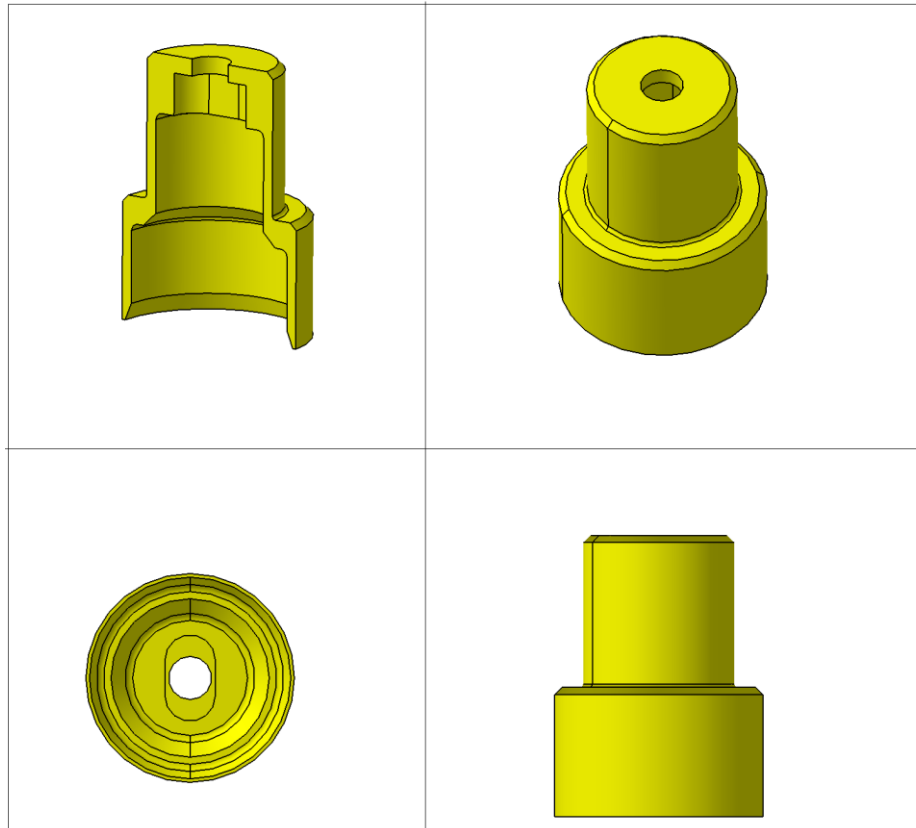


Figura 7.41: Conjunto de vistas de la pieza MT2-DI-00-03

Por otro lado, dentro de ésta pieza se alojan las rótulas donde van montadas las botellas telescópicas. En la Fig. XX se puede ver que hay un alojamiento ovalado, que sirve para encajar la cabeza hexagonal e impedir la rotación al momento de fijarla con un tornillo.

Por otro lado, el diámetro externo de la zona inferior del casquillo ha sido uno de los principales quebraderos de cabeza que ha dado el conjunto MT2-DI-00-00. Por un lado, la zona externa es donde van colocados los semimanillares, y era necesario que tuviera un diámetro estándar para poder usar semimanillares comerciales (figura 7.42). Al mismo tiempo, cuando la suspensión se encuentra comprimida totalmente, las botellas se introducen unos mm dentro del casquillo, por lo que era necesario hacerlo lo más grande posible (figura 7.43) para que no se produjesen choques entre las botellas y el casquillo durante la fase de compresión de la suspensión.

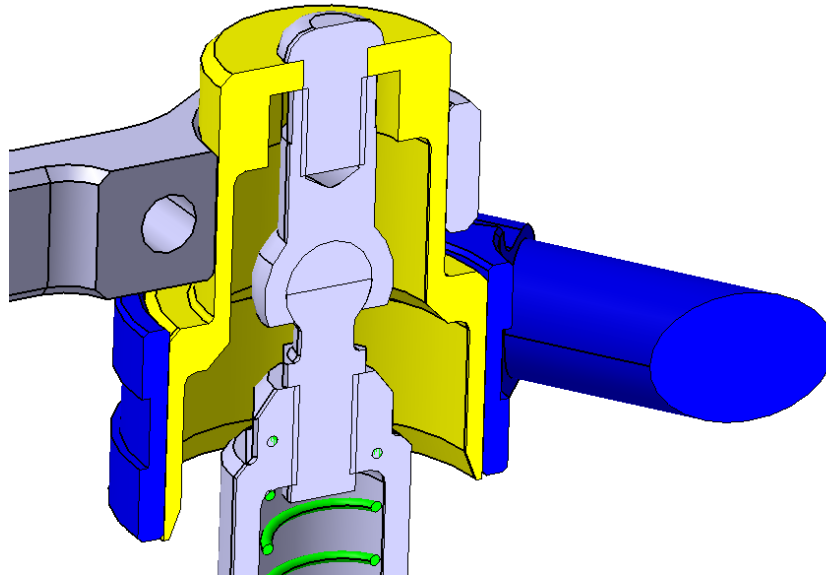


Figura 7.42: Corte de la pieza MT2-DI-00-03 en su montaje final.

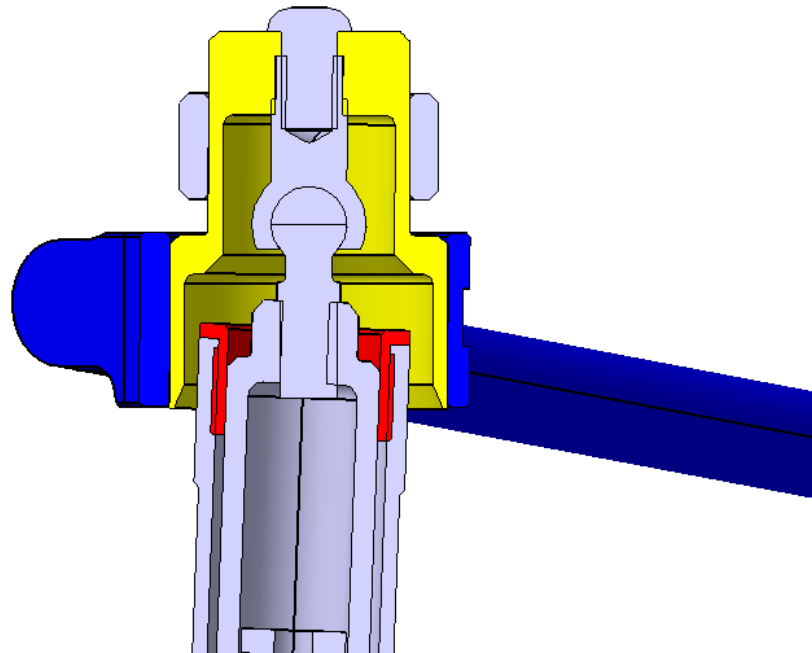


Figura 7.43: Corte de la pieza MT2-DI-00-03 en su montaje final con la suspensión totalmente comprimida.

Finalmente, el compromiso entre ambos problemas se ha alcanzado con un diámetro externo de 58mm y un grosor de pared de 3mm.

- **Rótulas (FM-M12).**

Para las rótulas que unen los casquillos MT2-DI-00-03 con las botellas telescópicas, se han usado el modelo FM-M12 de la empresa Midwest Control Products. Según el fabricante, las rótulas están construidas en acero de calidad C1018, y tienen las siguientes dimensiones:

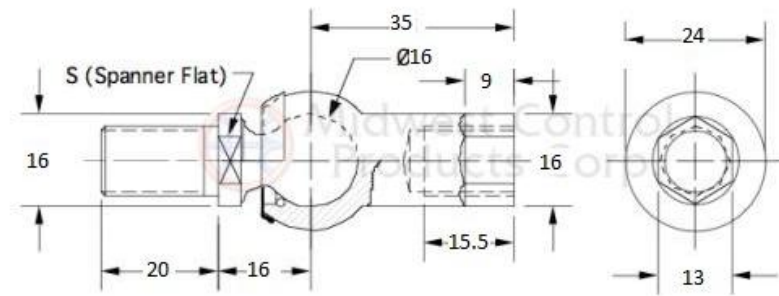


Figura 7.44: Características de la rótula Midwest Control FM-M12.

Como se puede ver en la figura 7.42, esta pieza se une a la MT2-DI-00-03 mediante un tornillo roscado en la parte superior de la rótula y que muerde el casquillo. Mientras que, por su parte inferior está roscada a la botella MT2-DI-00-04.

- **Botella superior (MT2-DI-00-04).**

La botella superior del conjunto de barras telescópicas tiene un diámetro de 32mm, un grosor de pared de 4,5mm y una longitud total de 194mm. En su parte inferior tiene un roscado exterior para acoplar un casquillo de bronce que facilite el deslizamiento. Mientras que en su parte superior tiene un roscado interno en el que se instala la rótula, y un rebaje hexagonal para facilitar su montaje.

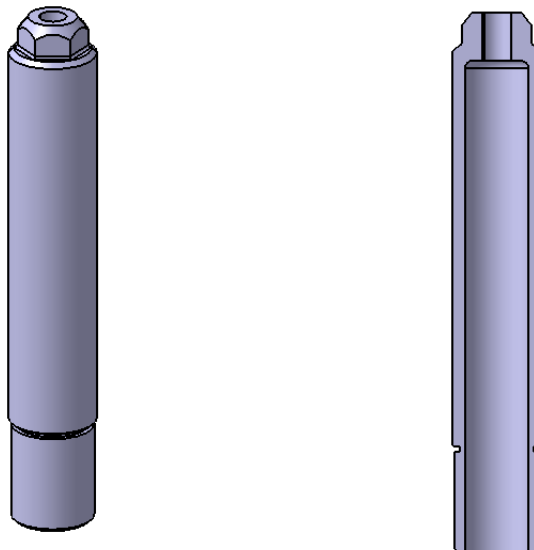


Figura 7.45: Pieza MT2-DI-00-04

Uno de los principales desafíos que planteaba esta pieza era la necesidad de ser lo suficientemente larga como para tener un buen solape cuando la suspensión se encontrase totalmente extendida sin llegar a hacer tope cuando la suspensión se comprimiese. Todo ello teniendo en cuenta que la longitud del conjunto estaba limitada por la localización de la pipa de dirección y de la horquilla de la suspensión. Además la botella debía tener el suficiente diámetro interno para poder alojar un muelle de las características buscadas, teniendo en cuenta que aumentar el diámetro de la botella superior supone aumentar el diámetro de la botella inferior, corriendo el riesgo de que, si ésta es muy gruesa, se produjese un choque entre ella y el casquillo de los semimanillares. Finalmente, con un diámetro interno de 23mm se ha logrado alcanzar todos los compromisos.

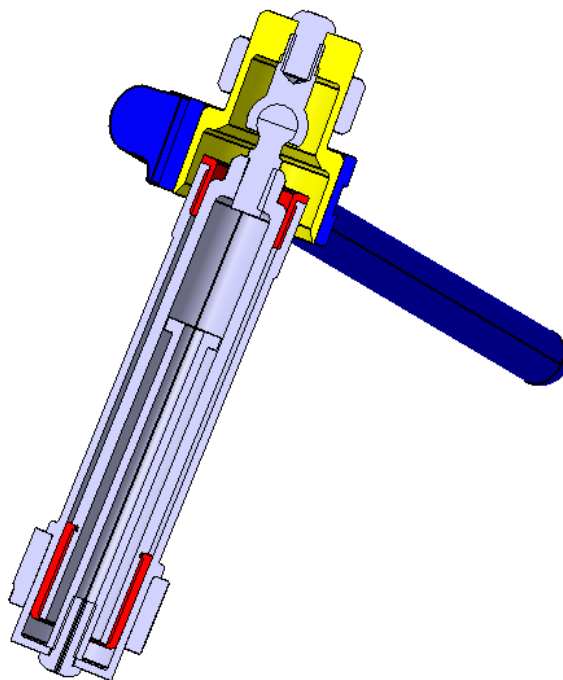


Figura 7.46: Pieza MT2-DI-00-04 en su montaje final, con la suspensión totalmente comprimida.

- Botella inferior (MT2-DI-00-05).**

La botella inferior del conjunto de barras telescópicas tiene un diámetro externo de 42 mm, un grosor de pared de 3 mm y una longitud de 198 mm. En su parte superior tiene un roscado interno para poder acoplar un casquillo de bronce que facilite el deslizamiento. Mientras que en su parte inferior tiene un resalte que sirve como apoyo sobre la tija.

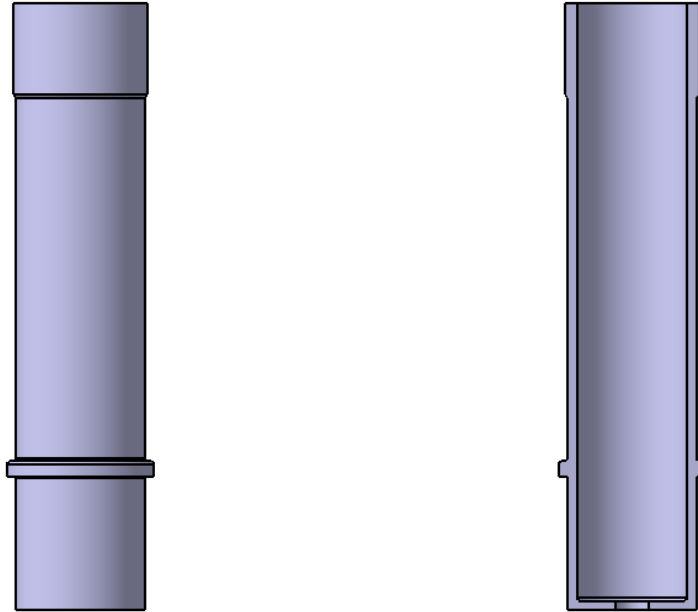


Figura 7.47: Pieza MT2-DI-00-05.

Como se explicaba anteriormente, esta pieza, en combinación con la MT2-DI-00-04 planteaba la necesidad de ser lo suficientemente larga como para tener un buen solape cuando la suspensión se encontrase totalmente extendida sin llegar a hacer tope cuando la suspensión se comprimiese. Finalmente, se han superado los 50 mm de solape que se plantearon inicialmente y se han alcanzado los 67 mm.

- **Casquillo de bronce superior (MT2-DI-00-06).**

Para facilitar el deslizamiento de las barras telescópicas se han diseñado dos casquillos de bronce que se acoplarán a cada una de las dos botellas. El casquillo MT2-DI-00-06 está roscado por su parte externa, y se acopla sobre la parte superior de la botella inferior. Cuenta con dos caras planas para facilitar su apriete.

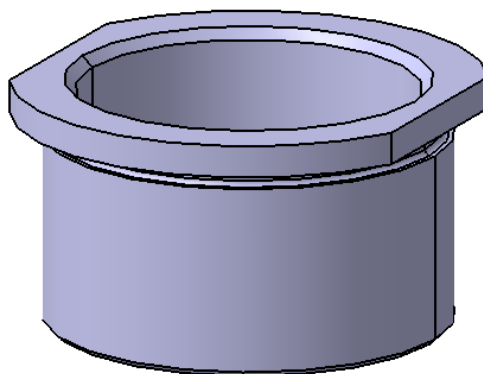


Figura 7.48: Pieza MT2-DI-00-06

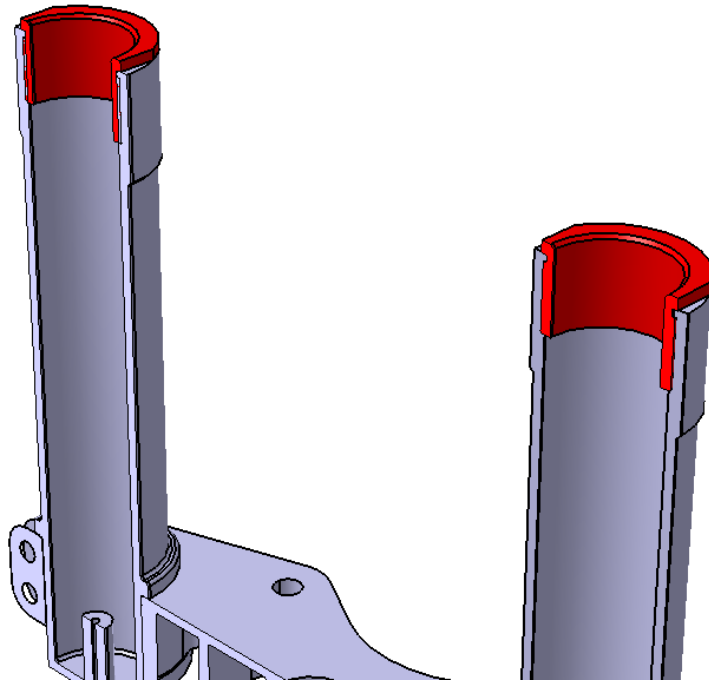


Figura 7.49: Pieza MT2-DI-00-06 roscada sobre la pieza MT2-DI-00-05

- **Casquillo de bronce inferior (MT2-DI-00-07).**

Este casquillo tiene las mismas características que el MT2-DI-00-06, con la salvedad de que tiene su roscado en la cara interior, para poder ser instalado en la parte inferior de la pieza MT2-DI-00-04.

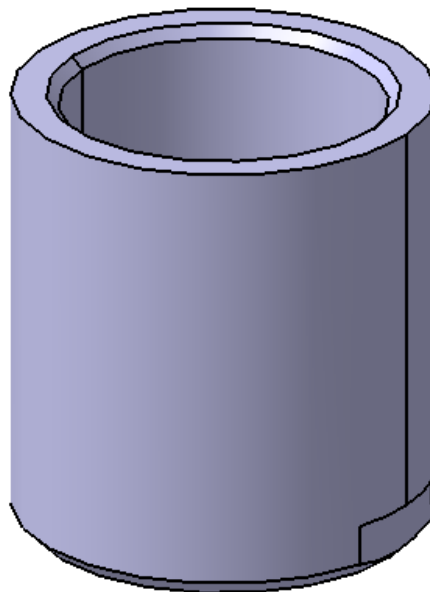


Figura 7.50: Pieza MT2-DI-00-07

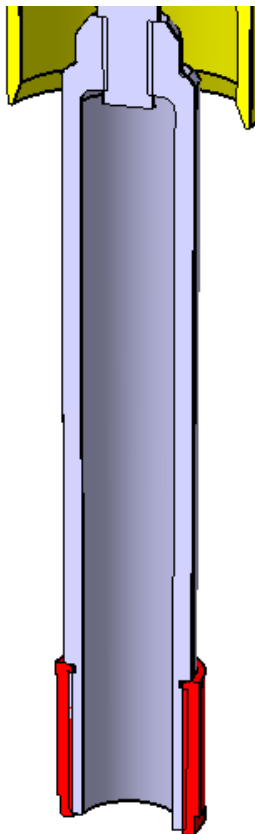


Figura 7.51: Pieza MT2-DI-00-07 roscada sobre la pieza MT2-DI-00-04

- **Vástago interno (MT2-DI-00-08).**

A la hora de plantear la disposición del muelle, se barajaron varias formas, entre ellas, la primera escogida y la más favorable para el trabajo del muelle, era la de instalar un muelle que ocupase toda la longitud de las barras, desde arriba de la barra MT2-DI-00-04, hasta la parte inferior de la barra MT2-DI-00-05. Sin embargo, con esta disposición se corría el riesgo de que el muelle pandease y de que alguna de las espiras se enganchara con la botella superior durante el movimiento de ésta.

Con la intención de evitar este tipo de problemas, se decidió instalar un émbolo sobre el que apoyase el muelle, de tal manera, para poder usar un muelle más corto y no correr el riesgo de pandear. Además, en la posición más expandida de la suspensión, el vástago nunca puede bajar más allá del final de la botella superior, de manera que todo el muelle se encuentre dentro de la botella MT2-DI-00-04 y ninguna espira corra el riesgo de engancharse con cualquier pieza.

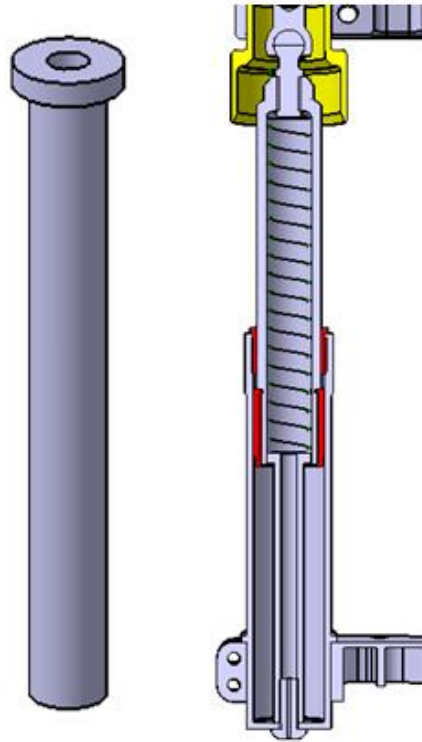


Figura 7.52: Pieza MT2-DI-00-08 (izda.). Montaje final de la pieza MT2-DO-00-08 (dcha.).

Por su parte inferior, el vástago tiene un roscado interno para poder ser atornillado a la parte inferior de la botella MT2-DI-00-05. Además, el vástago y el tornillo son huecos, de manera que, durante el trabajo de la suspensión, el aire contenido dentro de las botellas pueda entrar y salir fácilmente.

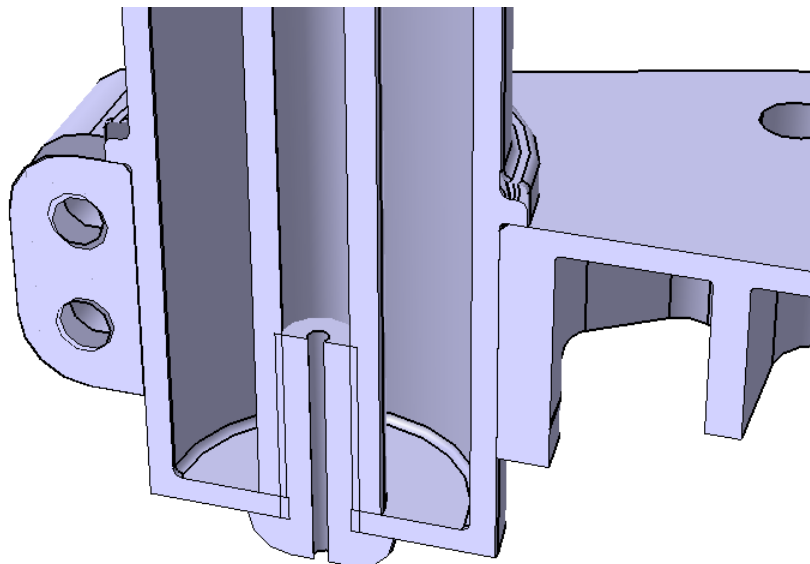


Figura 7.53: Detalle del anclaje de la pieza MT2-DI-00-08.

- **Muelle interno (C.223.180.2000.A).**

Para poder transmitir correctamente las fuerzas de la suspensión, se ha elegido el muelle C.223.180.2000.A de la empresa Vanel Muelles. Según el fabricante, las características del muelle son las siguientes, que en la tabla 7.2, aparecen comparadas con las condiciones de funcionamiento:

Tabla 7.2: Características del muelle VANEL C.223.180.2000.A

	Caract. Muelle	Condic. Funcionamiento
Diam.Orificio [mm]	22.969	23
Longitud [mm]	200.000	171.3 ²
Bloque [mm]	39.960	51.3
Diam.ext. [mm]	22.300	23
Rigidez [N/mm]	0.630	~1
Long.permitida [mm]	50.400	51.3
Long.Pandeo [mm]	176.140	171.3 ²

Como se puede ver en la tabla comparativa, aparentemente, todos los parámetros de funcionamiento cumplen con las características requeridas. Además, el muelle tiene una ligera precarga (29mm) que posibilita que las vibraciones de la suspensión se transfieran desde el principio del movimiento.

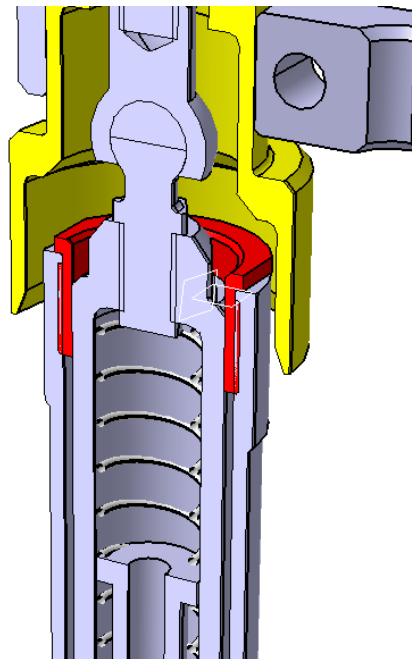


Figura 7.54: Montaje final del muelle.

² La longitud inicial cuando la suspensión está descargada puede variar aproximadamente entre 175mm y 164mm según la altura a la que se anclan los casquillos MT2-DI-00-03 a la tija MT2-DI-00-01.

Gracias al diseño del conjunto se ha logrado que los anclajes de las botellas permitan una rotación de 6.238° . Mientras que las botellas permiten un recorrido máximo de 128 mm.

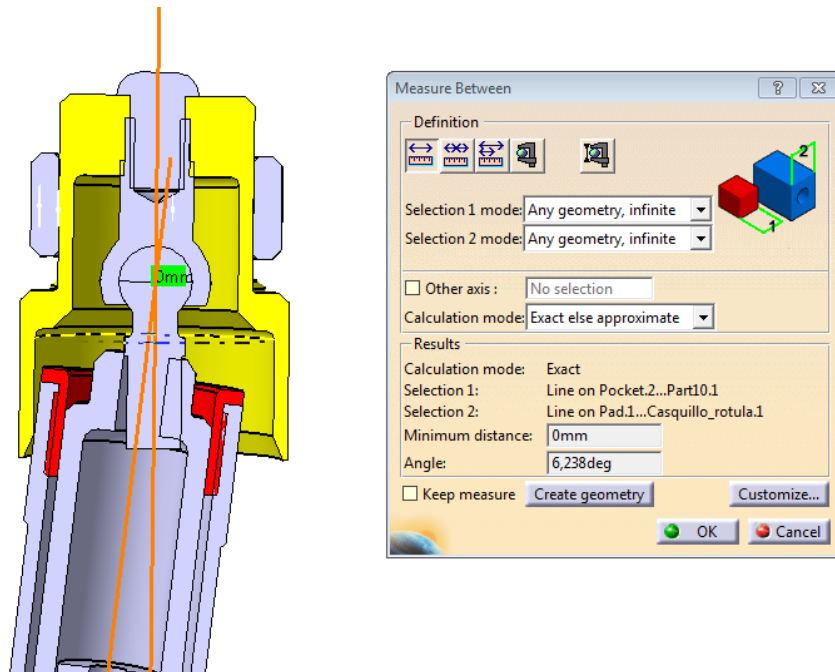


Figura 7.55: Ángulo máximo que el conjunto es capaz de pivotar alrededor de las rótulas.

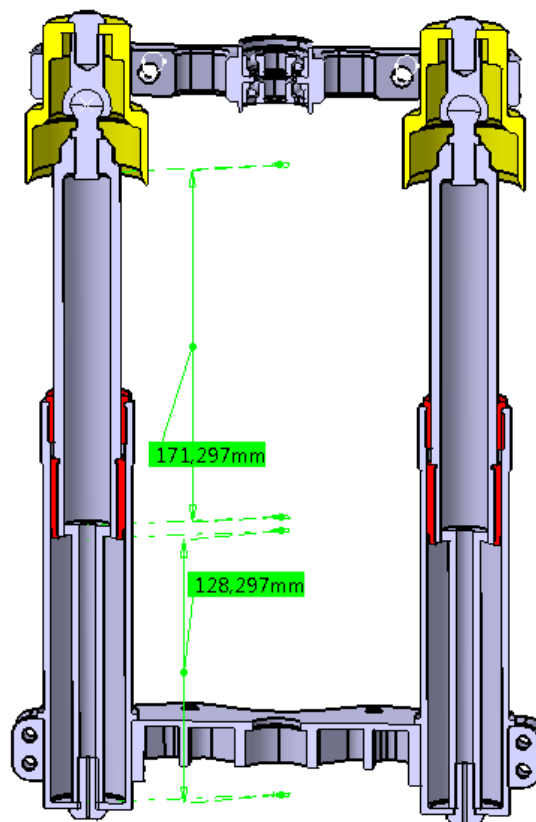


Figura 7.56: Espacios libres para el funcionamiento del conjunto MT2-DI-00-00.

7.7. PIPA DE DIRECCIÓN (MT2-DI-01-00).

Como se explicó en el apartado 4.2, esta motocicleta se encuentra clasificada dentro de las motocicletas sin pipa de dirección. Sin embargo, sigue siendo necesario, de cara al manejo de la misma, la existencia de un eje alrededor del que pivote el manillar. Este eje es el que se ha llamado “Pipa de dirección”.

Además de sujetar la parte superior del conjunto de dirección y definir un eje fijo alrededor del que giran la tija y los semimanillares, la pipa de dirección también permite una capacidad de regulación de cara a que el piloto encuentre la configuración de la motocicleta con la que esté más cómodo y que le permita reducir los tiempos por vuelta.

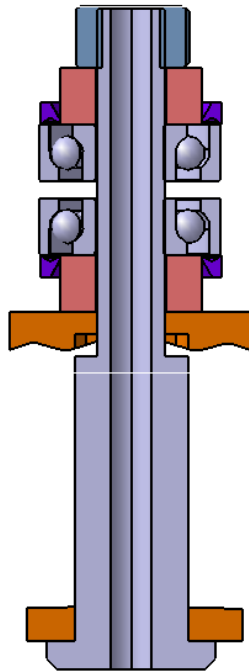


Figura 7.57: Corte del conjunto MT2-DI-01-00

El paquete va, además, instalado en el subchasis, al que se le ha practicado una ranura, de manera que se puedan elegir varias posiciones para la colocación de la pipa. Sin embargo, para evitar que la pipa se mueva a lo largo de la ranura durante el funcionamiento de la motocicleta, el paquete abraza al subchasis mediante dos presillas. Una de ellas, está mecanizada de tal manera que evita el deslizamiento una vez ha sido apretado el paquete.

- **Eje dirección (MT2-DI-01-01).**

Este es el eje sobre el que van montados los rodamientos alrededor de los que pivota el conjunto MT2-DI-00-00. En su parte superior consiste en un eje de 12mm de diámetro con una rosca exterior en el extremo. Mientras que, por su parte inferior, tiene 20mm de diámetro y dos caras planas que apoyan sobre el subchasis, evitando la rotación del eje cuando se apriete el paquete. Está rematado por una cabeza plana que limita el movimiento axial. Todo el eje está hueco en su interior para disminuir el peso del conjunto.

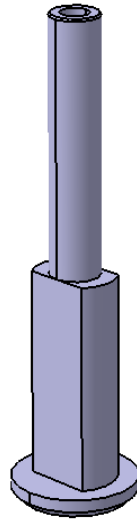


Figura 7.58: Pieza MT2-DI-01-01

- **Presillas superior e inferior (MT2-DI-01-02/03).**

Para evitar el deslizamiento del paquete de la pipa a lo largo de la ranura donde se aloja, se hace uso de dos presillas que muerden el subchasis cuando se aprieta el paquete. La presilla inferior es lisa y tiene un agujero por el que se introduce el eje, mientras que la presilla superior tiene una de sus caras mecanizadas para encajar en el mecanizado del subchasis (a modo de macho/hembra) para evitar el deslizamiento del paquete una vez éste ha sido apretado.

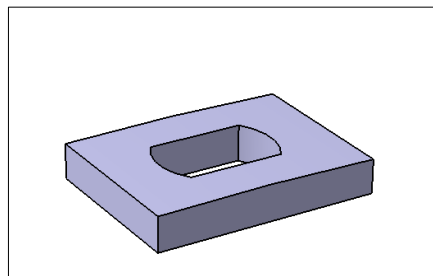


Figura 7.59: Pieza MT2-DI-01-03

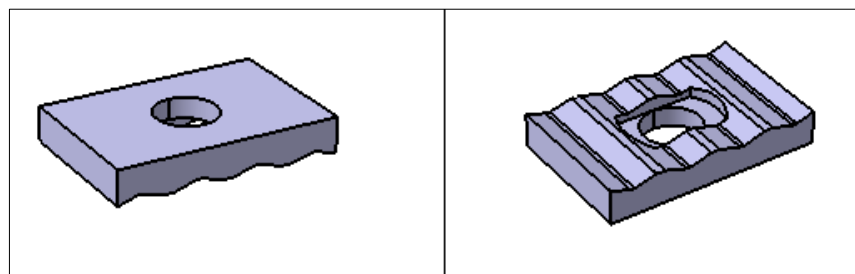


Figura 7.60: Pieza MT2-DI-01-02

- **Subchasis delantero (MT2-SUB-00-01).**

El diseño de subchasis delantero no es el objeto de este documento, sin embargo, el

alojamiento de la pipa de dirección en el subchasis es importante para el funcionamiento de la dirección. Se trata de una ranura alargada sobre la que pueden elegirse varias posiciones en las que montar la pipa de dirección. Estas distintas posiciones están enfocadas hacia el desarrollo futuro de un sistema de configuración del “set-up” de la dirección.

Para evitar que esta se mueva, la parte superior está mecanizada para quedar encajada con la presilla superior.

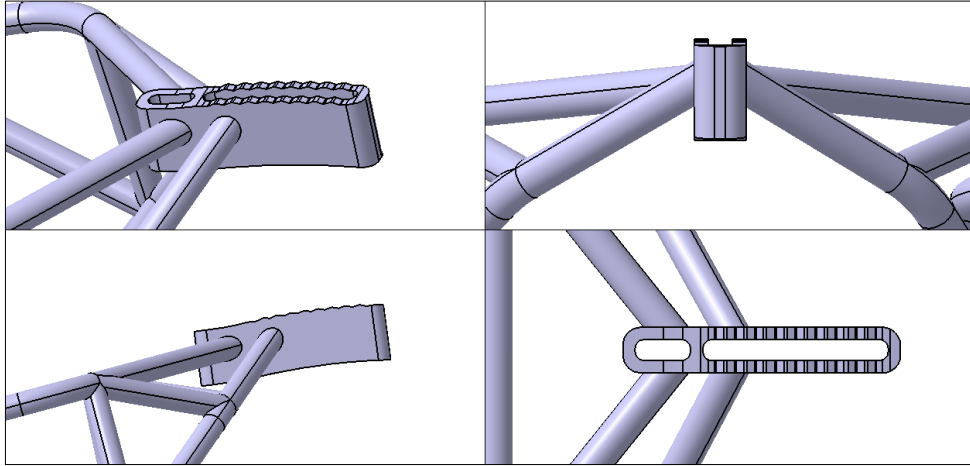


Figura 7.61: Detalle del alojamiento de la pipa de dirección.

En la figura 7.62 se puede ver un corte de la unión del conjunto MT2-DI-00-00, MT2-PD-00-00 y el subchasis delantero.

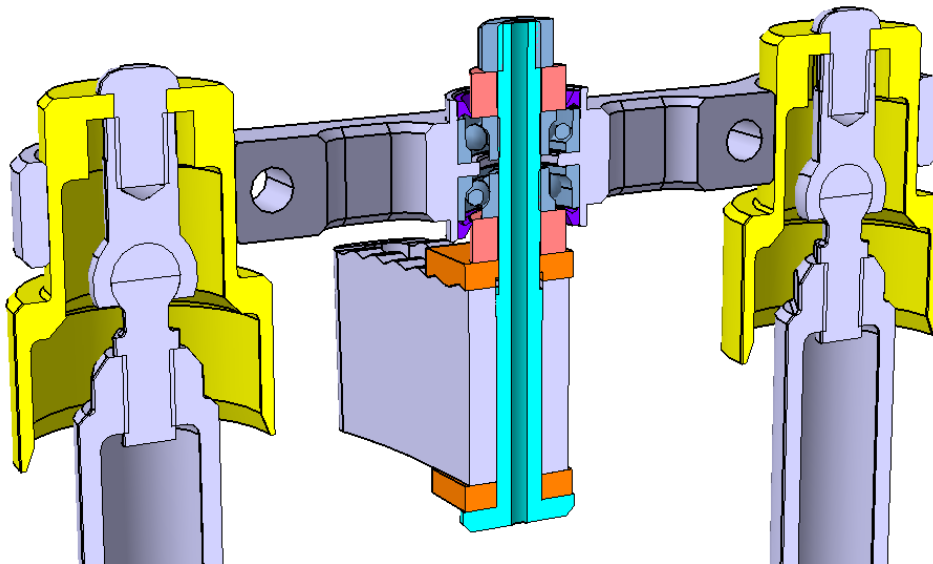


Figura 7.62: Corte de los conjuntos MT2-DI-01-00 y MT2-DI-00-00 instalados sobre la motocicleta.

8. Cálculos justificativos

Una vez realizado un diseño de toda la columna de la dirección, es importante comprobar que éste cumple con todos los requerimientos finales que impone el sistema formado junto con el resto de la motocicleta. Estas comprobaciones se han basado en criterios mecánicos y estructurales.

Por un lado, el sistema de dirección debe ser capaz de funcionar en conjunto con la suspensión, y debe poder absorber los movimientos que ésta produce. Esto se ha comprobado comparando los resultados de un modelo gráfico, con las características del sistema de dirección.

Por otro lado, el sistema de dirección debe ser capaz de soportar los esfuerzos mecánicos. Gracias al método de los elementos finitos, se han obtenido los valores de tensiones y desplazamientos máximos que las cargas producen en las piezas del sistema. Comprobando así si éste las resiste o no.

8.1. SIMULACIONES DINÁMICAS

Planteado el sistema final, es necesario realizar una comprobación de su funcionalidad mediante un software de simulación de sólido rígido en 2D. Esta comprobación se ha enfocado principalmente en la interacción entre el funcionamiento de la suspensión y la dirección.

Una vez obtenidas las posibilidades que ofrece el sistema de dirección en cuanto a ángulos de giro o desplazamientos de sus componentes, estos valores se han comparado con los requerimientos de funcionamiento, para justificar que el sistema es válido.

En la tabla 8.1, aparecen reflejadas las capacidades del sistema.

Tabla 8.1: Ángulos y desplazamientos máximos que permite el sistema de dirección.

Ángulo máximo de pivotamiento de las barras telescópicas	6.238°
Ángulo máximo de pivotamiento de la tija inferior con respecto a la suspensión	11.114°
Recorrido máximo de las barras telescópicas	128.3mm

En el software se ha introducido un modelo gráfico de la suspensión y la dirección, y se ha comprobado su cinemática y su geometría.

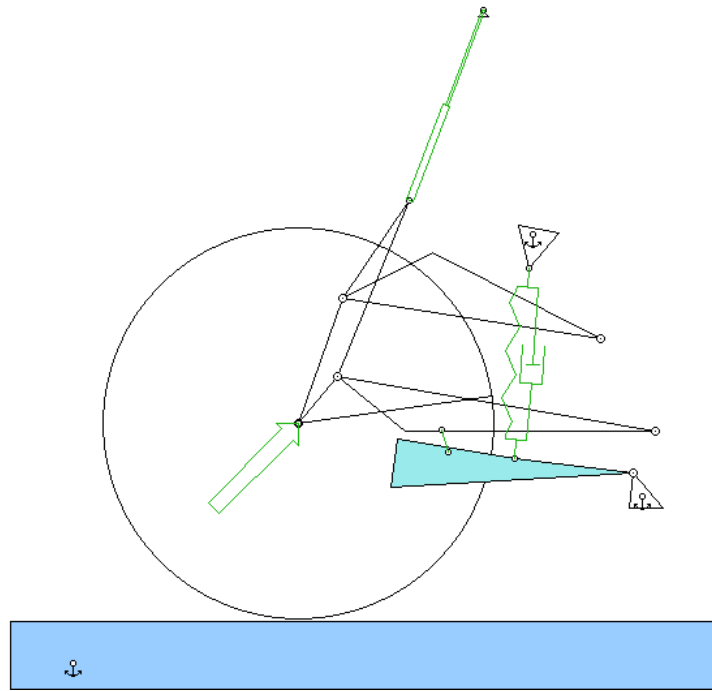


Figura 8.1: Modelo gráfico usado para las simulaciones de sólido rígido.

Una vez introducida la geometría, las uniones entre elementos, las condiciones de contorno y las cargas aplicadas, el software permite simular la cinemática del mecanismo.

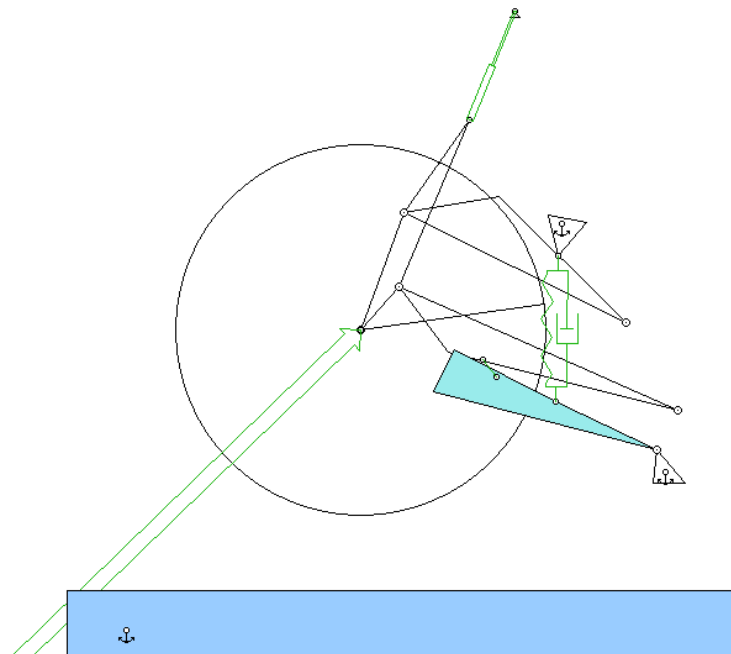


Figura 8.2: Modelo gráfico de la suspensión comprimida.

El programa proporciona una gran cantidad de información sobre la dinámica del mecanismo. De todas ellas se han elegido las que mejor describen la interacción entre la suspensión y la dirección.

RECORRIDO DE LA SUSPENSIÓN.

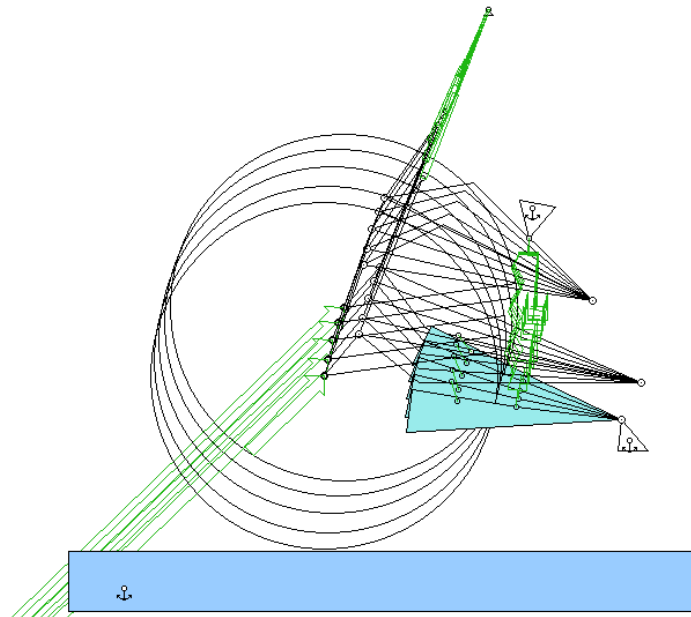


Figura 8.3: Esquema del recorrido de la suspensión delantera.

En la figura 8.3, se puede apreciar que la suspensión sigue una trayectoria prácticamente rectilínea. Gracias a ello, las uniones con rótulas pivotan muy poco, lo que permite una mayor libertad de diseño.

DESPLAZAMIENTO DEL CENTRO DE LA RUEDA

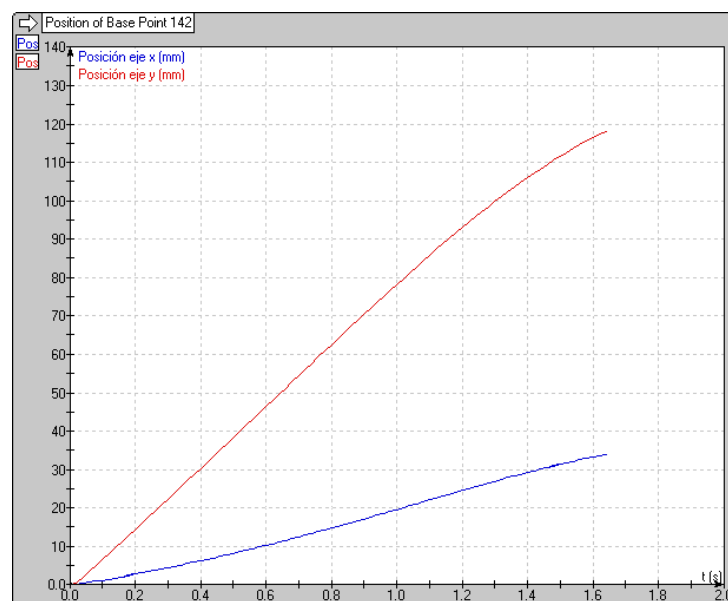


Figura 8.4: Posición del centro de masas de la rueda en a lo largo del tiempo.

DESPLAZAMIENTO DE LA TIJA INFERIOR

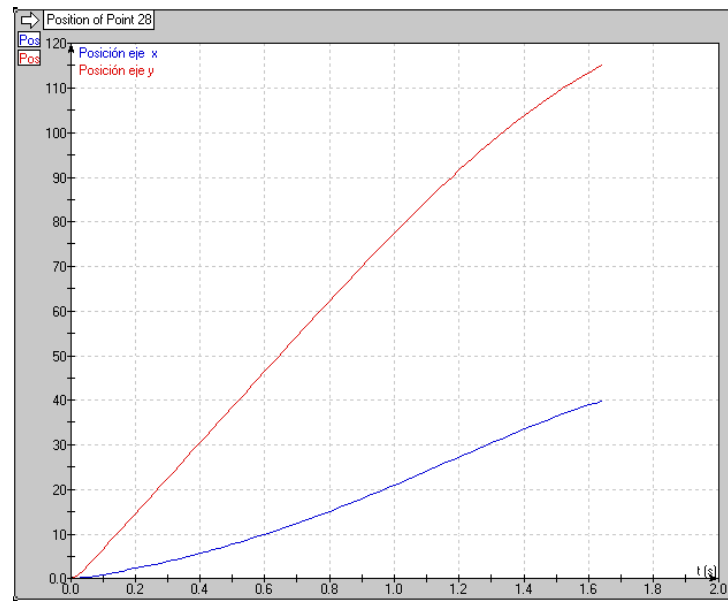


Figura 8.5: Desplazamiento de la tija inferior.

Es interesante comprobar cómo, debido al buen diseño de las geometrías de los basculantes de la suspensión, el buje de la rueda y la tija inferior siguen prácticamente las mismas trayectorias. Esto es un indicativo de que la suspensión está trabajando prácticamente en línea recta, sin alterar la geometría inicial.

ROTACIÓN DE LA HORQUILLA DE SUSPENSIÓN.

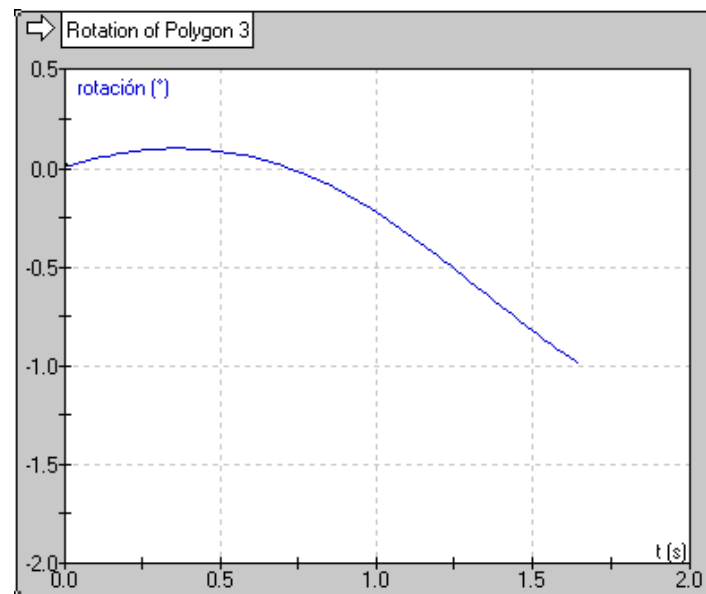


Figura 8.6: Rotación de la horquilla de la suspensión a lo largo del tiempo.

Como se comentaba en el punto anterior, la trayectoria seguida por la suspensión es prácticamente rectilínea, ya que únicamente pivota un ángulo máximo de 1° (en sentido horario).

ROTACIÓN DE LA TIJA INFERIOR CON RESPECTO AL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

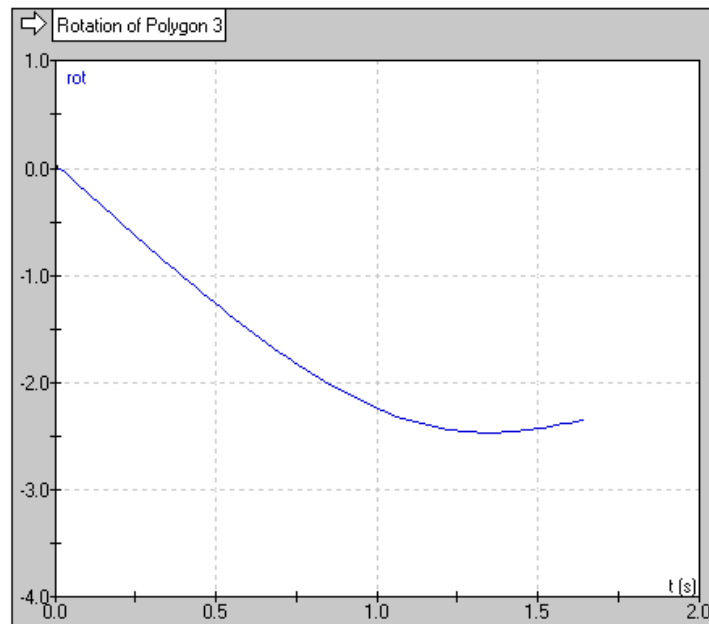


Figura 8.7: Ángulo pivotado por la tija inferior (MT2-DI-00-02) con respecto a la horquilla de dirección a lo largo del tiempo.

Esta gráfica indica el máximo ángulo girado entre la tija inferior y la horquilla de suspensión. Como se ha comprobado en el capítulo 7, y como aparece reflejado en la tabla 8.1, el diseño de este sistema permite una rotación máxima de 11.114° .

Como se puede ver, el máximo ángulo girado es de unos 2.5° , por lo que sus capacidades están muy por encima de los requerimientos que tendrá durante su uso.

ROTACIÓN DE LAS BOTELLAS TELESCÓPICAS.

En la figura 8.8 se puede apreciar la rotación de las botellas telescópicas de la dirección alrededor de su anclaje a la tija superior durante el funcionamiento de la suspensión.

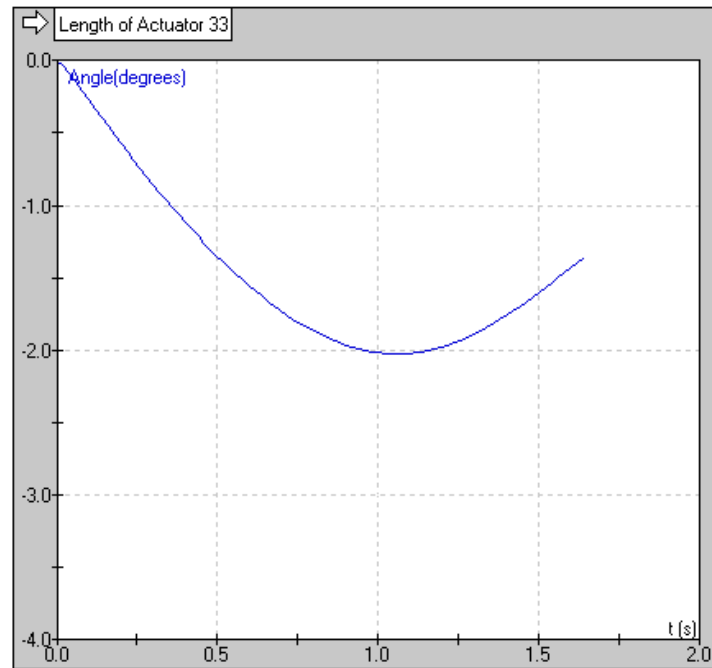


Figura 8.8: Rotación de las botellas telescópicas (conjunto MT2-DI-00-00) con respecto a su posición original.

Tal y como se ha visto en el apartado de diseño de la dirección, el conjunto permite que las botellas pivoten un ángulo máximo de 6.24° , mientras que el máximo ángulo requerido es de alrededor de 2° . Por lo que se concluye que el diseño resulta completamente funcional.

RECORRIDO DE LAS BOTELLAS TELESCÓPICAS DE LA DIRECCIÓN.

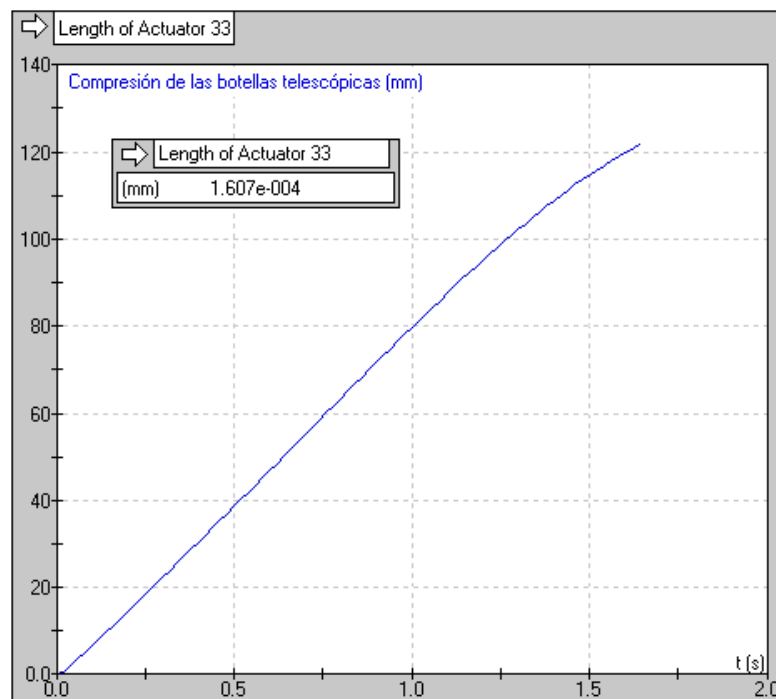


Figura 8.9: Compresión de las horquillas telescópicas (MT2-DI-00-00).

En el apartado de diseño de la dirección se ha comprobado que las botellas pueden absorber un desplazamiento relativo de 128 mm, mientras que el máximo requerido por la suspensión es de 121.7 mm, por lo que el diseño final mantiene su funcionalidad. Sin embargo, es necesario indicar que al realizar esta simulación se está usando un recorrido del amortiguador mayor del real, por lo que, en la práctica la compresión de las botellas de dirección será aún menor.

8.2. ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA (MEF)

Como se ha explicado en el apartado de metodología, el último paso de la cadena de validación de las piezas de la columna de dirección era el análisis mediante elementos finitos.

De aquí en adelante se muestran y explican los modelos matemáticos mediante los que se ha validado el diseño de la columna de dirección. También se exponen y analizan los resultados obtenidos en busca de una resistencia mecánica que garantice la integridad del mecanismo y una rigidez estructural que permita un correcto manejo de la motocicleta.

Todas las piezas han sido diseñadas para ser construidas en Aluminio 7075 con límite elástico de 500 MPa. Teniendo en cuenta el factor de seguridad $\gamma = 2$ que se ha adoptado en todo el proyecto, todas las piezas deben sufrir una tensión máxima $\sigma < 250 \text{ MPa}$.

Tabla 8.2: Características del aluminio 7075 T6

Material	Aluminium
Young's modulus	7e+010N_m2
Poisson's ratio	0,346
Density	2710kg_m3
Coefficient of thermal expansion	2,36e-005_Kdeg
Yield strength	5e+008N_m2

En cuanto a la rigidez del sistema, la columna de dirección en su conjunto debe torsionar un ángulo menor de 1° . Teniendo en cuenta el factor de seguridad γ , esto supone que la suma de todos los giros obtenidos debe ser menos de $0,5^\circ$.

8.2.1. Tija Superior y casquillos (MT2-DI-00-01 y MT2-DI-00-03)

En este apartado se estudia la tija superior y los casquillos que se usan como anclaje para los semimanillares. El principal objetivo de este análisis es comprobar la resistencia mecánica del conjunto. El momento de máximo esfuerzo de este conjunto se da lugar durante una frenada, en la que el piloto debe apoyar todo el peso de la parte superior de su cuerpo en los semimanillares para contrarrestar las fuerzas de inercia.

- **Definición condiciones interfaces**

En este caso, la única interfase es la que existe entre los casquillos y la tija. Para ello se ha impuesto una unión a presión entre ambas (simulando el apriete que ejerce la tija sobre el casquillo) suponiendo una interferencia radial de una micra.

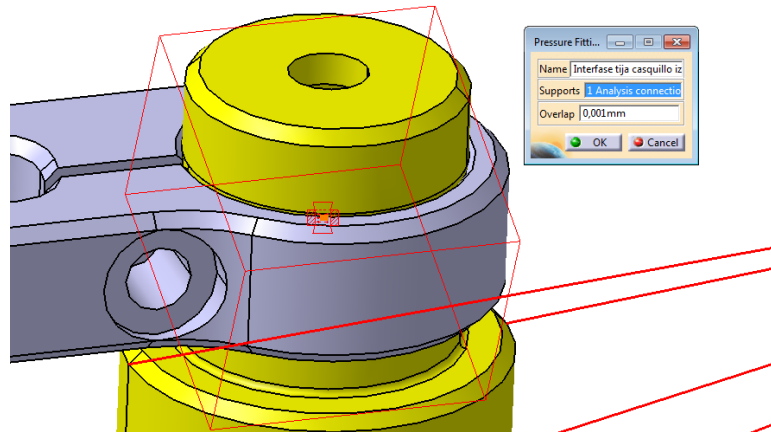


Figura 8.10: Unión a presión entre las piezas MT2-DI-00-01 y MT2-DI-00-03

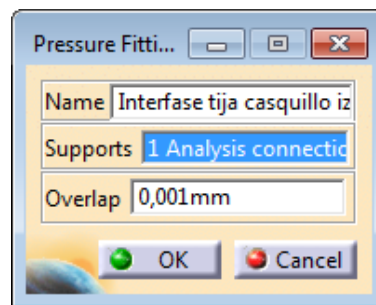


Figura 8.11: Detalles de la configuración de la interfase.

Además, aunque no se trate de una interfase como tal, para simular el apriete que los tornillos ejercen sobre la pipa, se ha impuesto un tornillo virtual en los agujeros de la tija.

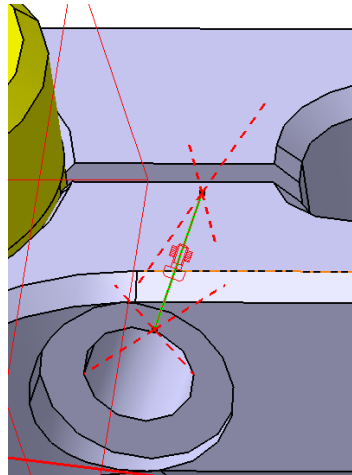


Figura 8.12: Modelado del tornillo virtual.

- **Definición condiciones de frontera**

Para simular el efecto del eje de dirección sobre la pipa se ha impuesto una condición de “deslizamiento” (*slider*) sobre las superficies circulares en las que apoyan los rodamientos de la dirección.

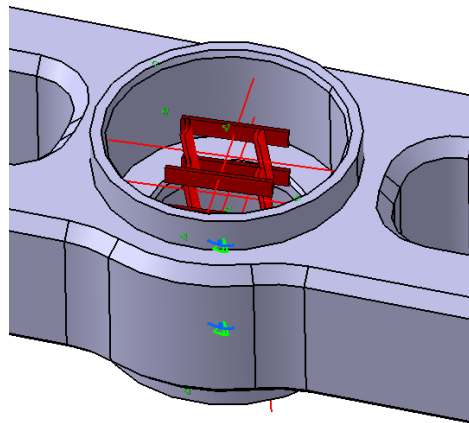


Figura 8.13: Representación gráfica de la condición de deslizamiento.

Se ha impuesto la misma condición de deslizamiento sobre la cara inferior del separador de la tija sobre la que apoyan los rodamientos. En la figura. 8.15 se pueden ver resaltadas en verde todas las caras sobre las que se ha impuesto la condición de deslizamiento.

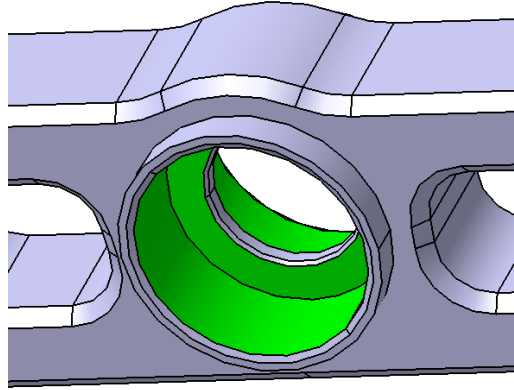


Figura 8.14: Superficies a las que se les ha aplicado la condición de deslizamiento.

- **Definición de cargas**

Para aplicar las cargas se ha recurrido a una “virtual part” que une, como si fuera un elemento infinitamente rígido, el punto extremo del semimanillar con el casquillo sobre el que se ancla. Esta “virtual part” sustituye el semimanillar, cuyos cálculos de resistencia ya ha realizado el fabricante.

De esta manera, la carga que ejerce el piloto tiene su punto de anclaje en el extremo más alejado del semimanillar. En la realidad, la carga se distribuye a lo largo del manillar, por lo que suponer que está aplicada sobre el extremo significa asumir unas condiciones menos favorables que las reales.

Tal y como se explica en el apartado de las pruebas de extensometría, el máximo esfuerzo que el piloto ejerce sobre el semimanillar es de 12kg por cada semimanillar, en formando un ángulo de 30° con la horizontal.

Estos datos no han sido obtenidos directamente, si no que los resultados de las mediciones han sido procesados para calcular los datos. Esto significa que en algún punto de ese proceso ha podido producirse algún error. Además es importante que la motocicleta siga siendo válida para pilotos más corpulentos. Por todo ello, en este caso particular no se ha usado el coeficiente de mayoración habitual $f_{mayo} = 1.5$, si no que se ha usado un coeficiente mayor $f_{mayo} = 2.13$.

$$F_{Total} = 12\text{kg} * 9,8 * 2.13 = 250\text{N}$$

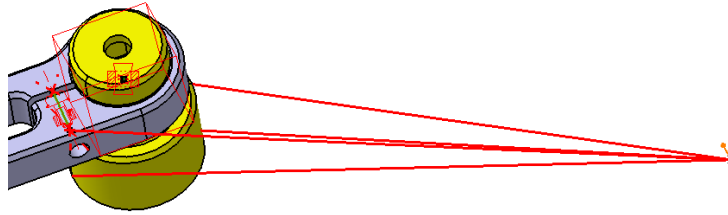


Figura 8.15: Representación de la "virtual part" que simula el semimanillar.

Tal y como se puede ver en la figura 8.17, la fuerza está aplicada formando un ángulo de unos 30° con la horizontal.

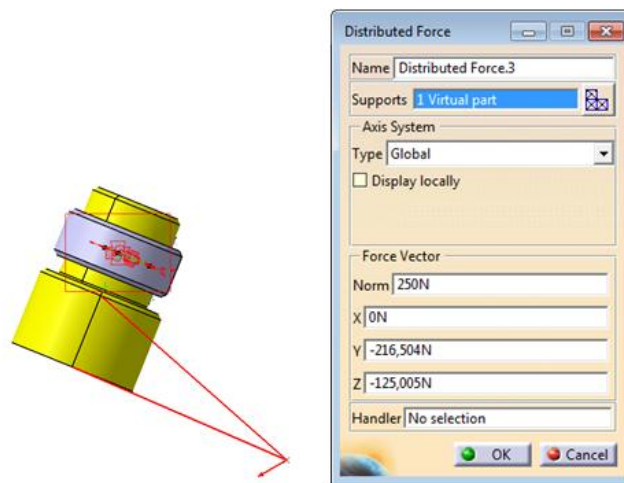


Figura 8.16: Detalles de la configuración de la aplicación de la carga.

- **Definición malla**

Para este análisis se ha usado una malla general con las mismas características en el caso de la tija y de los casquillos, con un tamaño de elemento de 2 mm y una flecha máxima de 0.5 mm.

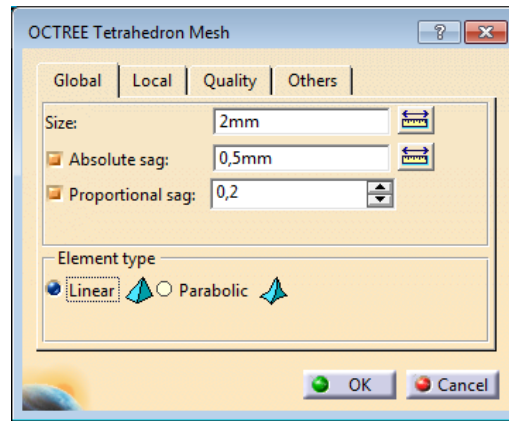


Figura 8.17: Detalles de la definición de la malla.

Además, tras lanzar una primera simulación y comprobar los puntos que acumulaban más tensiones se han realizado dos refinamientos. Uno de ellos en la tija y el otro en los casquillos.

En la tija se ha hecho un refinamiento en el vaciado que aloja las cabezas de los tornillos. Se han usado elementos de 1mm

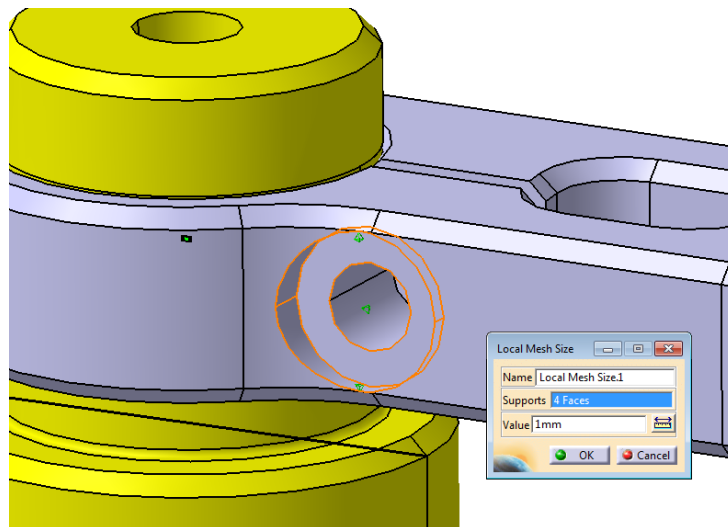


Figura 8.18: Superficie refinada y detalle de la configuración del refinado.

Por otro lado, en las superficies de los casquillos que apoyan sobre la tija se ha realizado otro refinado con elementos de 1mm.

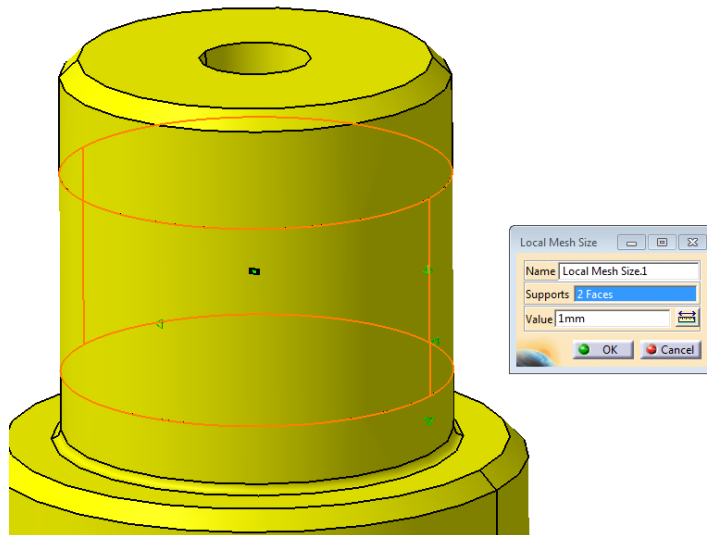


Figura 8.19: Superficie refinada y detalle de la configuración del refinado.

La malla usada finalmente aparece en la figura 8.21.

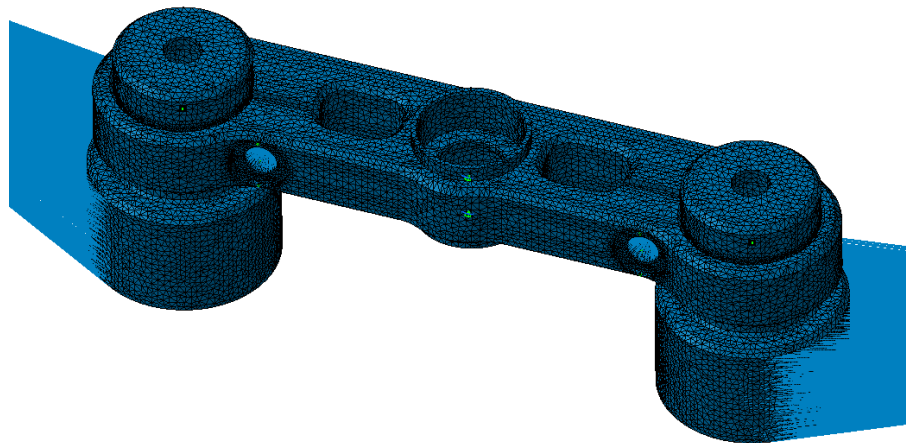


Figura 8.20: Malla utilizada en el análisis.

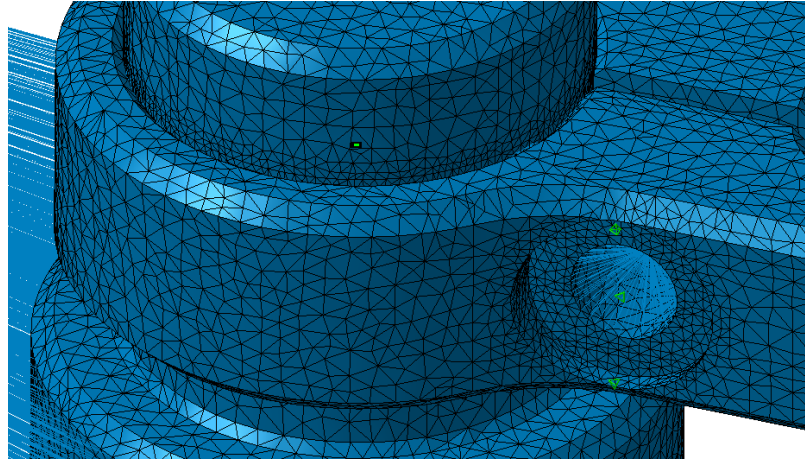


Figura 8.21: Detalle del refinado.

- **Resultados**

Tras la simulación, se obtiene una tensión máxima de 175 MPa.

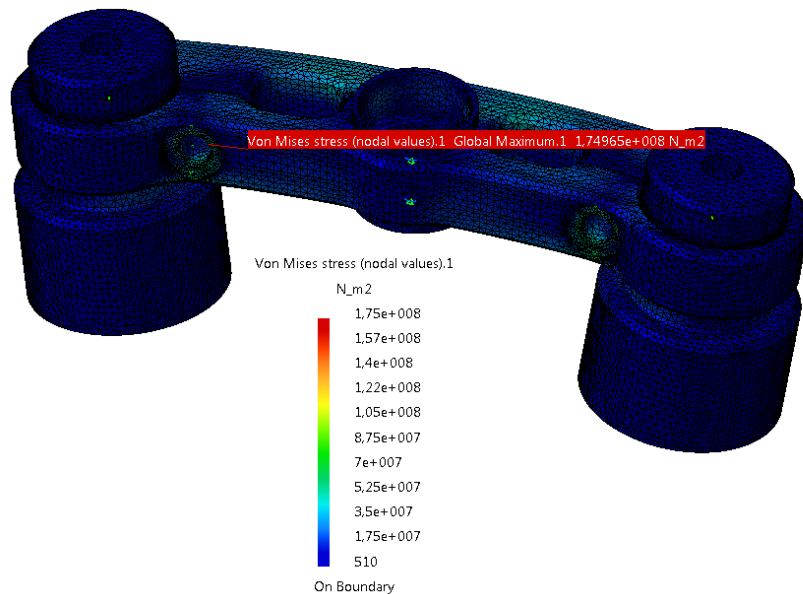


Figura 8.22: Representación cromática de las tensiones sufridas por la pieza.

Esta tensión máxima está localizada en el cambio de sección del alojamiento del tornillo de la tija.

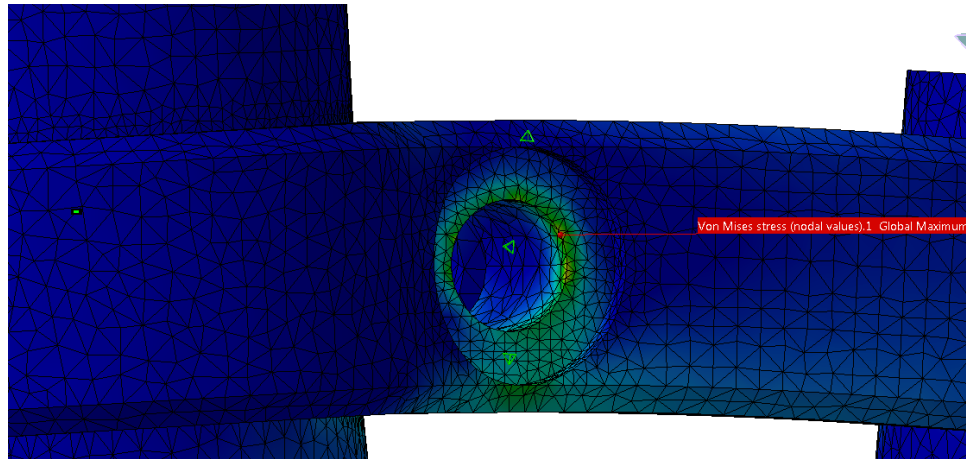


Figura 8.23: Detalle de la máxima tensión sufrida.

Como se puede ver, la tija cumple el factor de seguridad y supera el criterio impuesto de tener una tensión de Von Misses menor de 245 MPa. Por tanto, el subconjunto se da como válido.

8.2.2. Pipa de dirección (MT2-DI-01-00)

Como ya se ha explicado, el único punto de apoyo de la tija es el eje sobre el que pivota. Por tanto, todos los esfuerzos que sufre la tija, se transfieren directamente a este eje. Por ello, es necesario analizar la resistencia mecánica del eje.

El eje, va apoyado sobre unas abrazaderas que lo mantienen fijo al subchasis delantero, por ello, las abrazaderas también se han introducido en el ensayo.

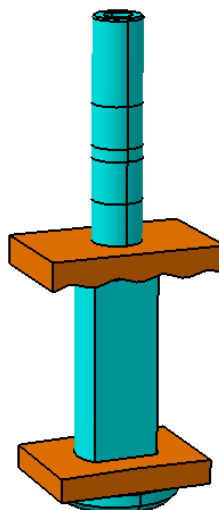


Figura 8.24: Subconjunto a analizar.

- **Definición condiciones interfaces**

Entre eje y abrazaderas se ha introducido conexiones rígidas que impiden el movimiento relativo entre ambas piezas.

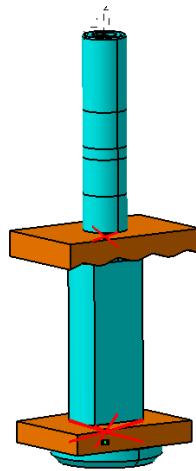


Figura 8.25: Interfaces entre el eje y las mordazas.

- **Definición de condiciones de frontera**

Para simular el anclaje que tiene lugar entre el subchasis y las mordazas, las caras de éstas que muerden al subchasis se han empotrado.

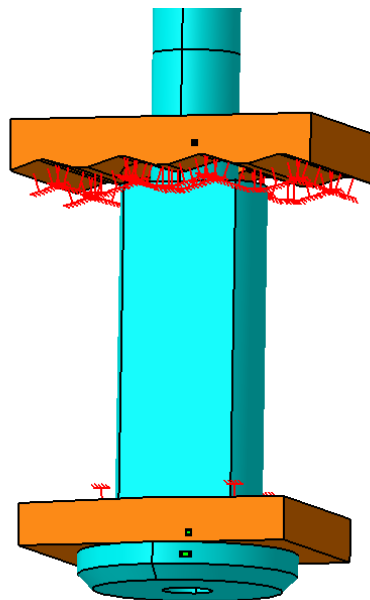


Figura 8.26: Empotramientos aplicados.

- **Definición de cargas**

Para realizar la simulación, se han usado las mismas cargas impuestas sobre la tija. Con la diferencia de que, en el caso de la tija, estas cargas estaban aplicadas sobre los

semimanillares, y ahora están aplicadas sobre los apoyos de los rodamientos en el eje. En ambos casos existen dos apoyos, por lo que se usan los mismos valores.

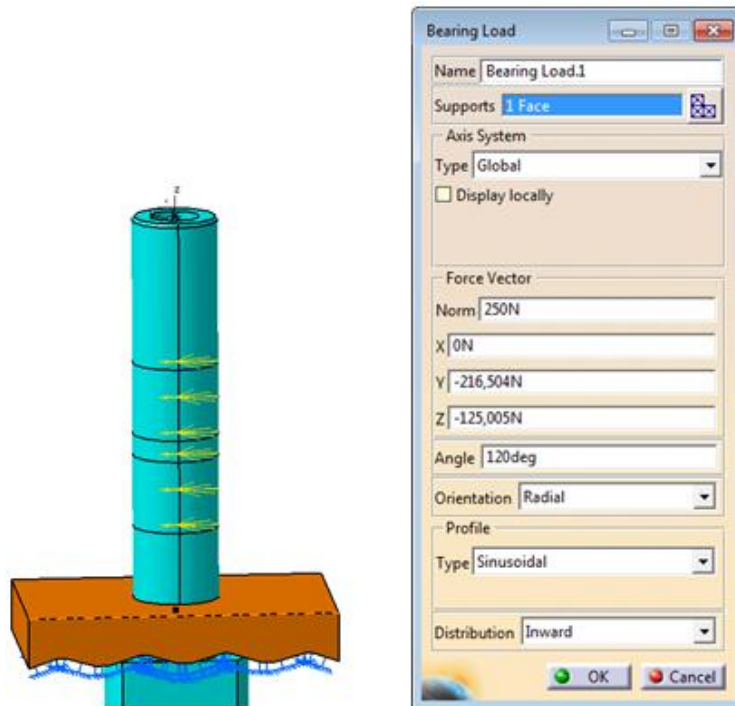


Figura 8.27: Detalle de la aplicación de las cargas distribuidas sobre el eje.

- **Definición de malla**

Para el análisis se han realizado tres mallas distintas, una para cada uno de los tres elementos del subconjunto.

Para el eje se ha usado una malla con elementos de un tamaño de 2mm y flecha máxima de 0.4mm.

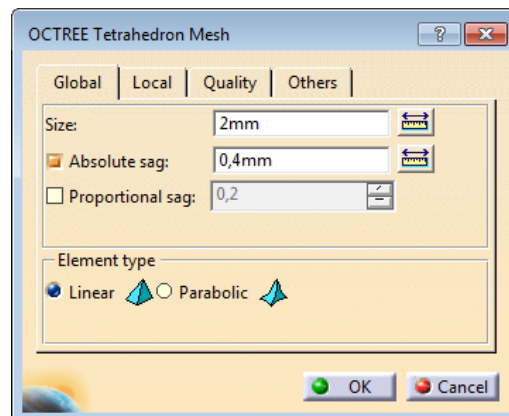


Figura 8.28: Detalle de la configuración de la malla empleada en el eje.

Mientras que, para las mordazas, se han escogido unos elementos de 1,5 mm y una flecha máxima de 0,3 mm.

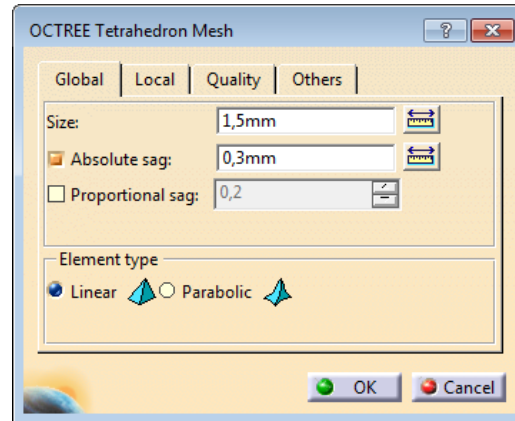


Figura 8.29: Características de la malla empleada en las mordazas.

Después de lanzar una primera simulación, se detectó que la zona de concentración de tensiones estaba localizada en el apoyo entre el eje y la mordaza superior, por lo que se hizo un refinado en esta zona. Se impuso un tamaño de elementos de 0,5 mm y una flecha máxima de 0,1 mm.

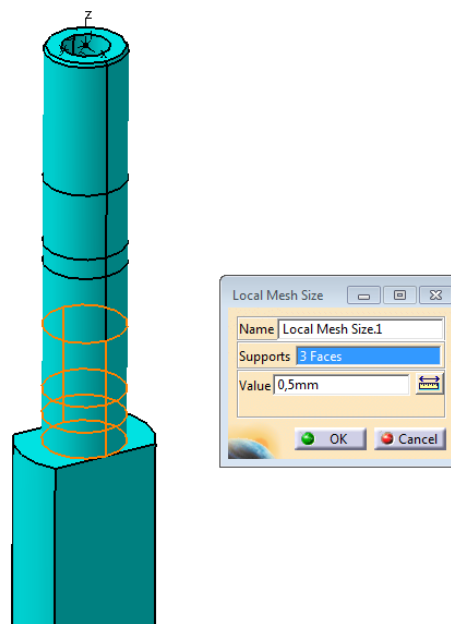


Figura 8.30: Refinamiento en la zona de mayor cúmulo de tensiones.

Además, para evitar un cambio brusco en el tamaño de los elementos, en las zonas adyacentes y en el vaciado interior del eje se realizó un refinado algo más grosero, con elementos de 1mm.

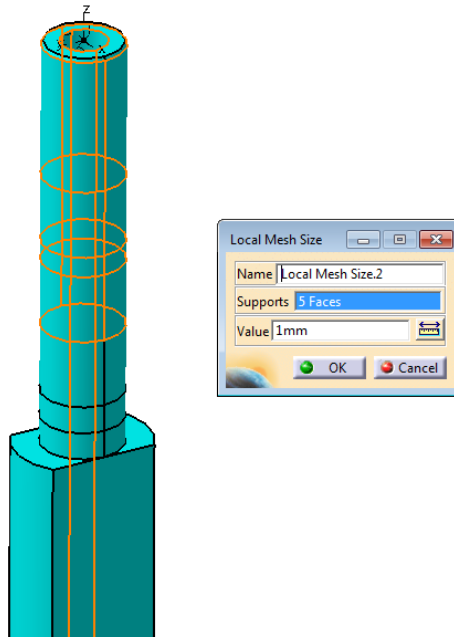


Figura 8.31: Refinamiento en las proximidades de la zona de mayor cúmulo de tensiones.

De esta manera, la malla final quedó tal y como aparece en la figura 8.33.

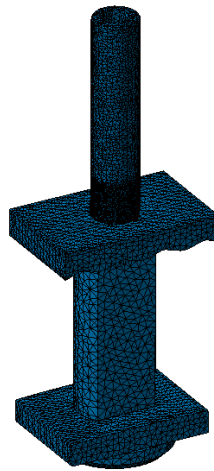


Figura 8.32: Mallado final del subconjunto de la pipa de dirección.

En la figura 8.34 puede apreciarse un detalle del refinamiento de la malla en las proximidades al punto de concentración de tensiones.

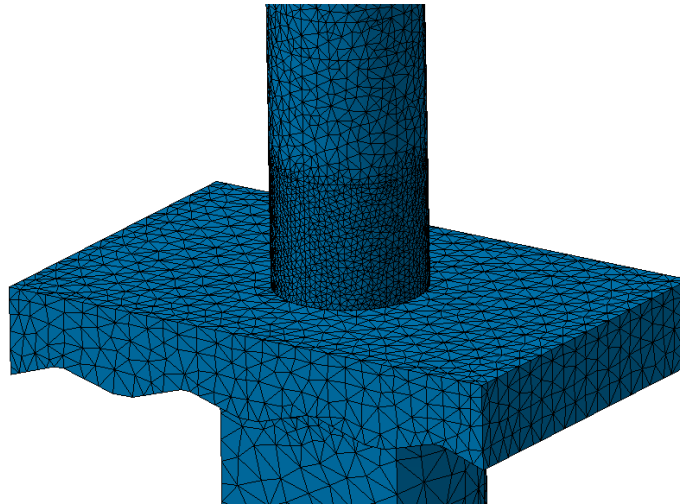


Figura 8.33: Detalle de la zona refinada.

- **Resultados**

Una vez lanzada la simulación, se obtuvo una tensión máxima de 94,4 MPa.

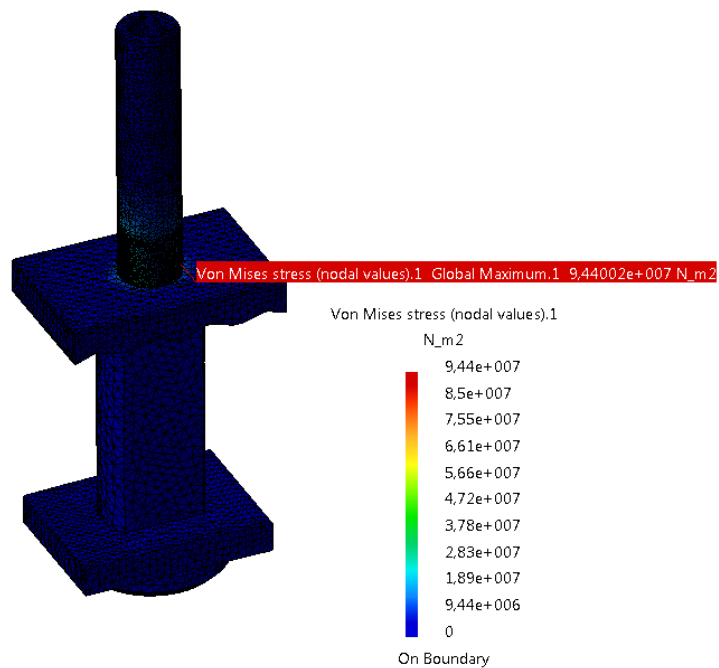


Figura 8.34: Representación cromática de las tensiones sufridas.

El punto de máxima tensión estaba, como era de esperar en la interfaz entre la mordaza superior y el eje.

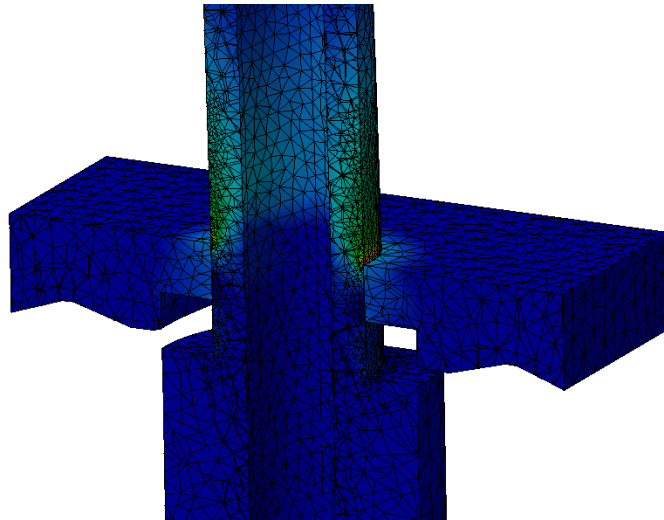


Figura 8.35: Detalle al corte de la zona de mayores tensiones.

Una vez analizados los resultados, se ha obtenido que su máxima tensión es menor de 245 MPa, por lo que cumple con el criterio establecido. Por tanto, se considera que el subconjunto es válido.

8.2.3. Conjunto botellas telescópicas (MT2-DI-00-00)

En este análisis se comprueba la resistencia de todo el conjunto de las botellas telescópicas que transmiten los esfuerzos de dirección, exceptuando los casquillos y la tija anteriormente simulados.

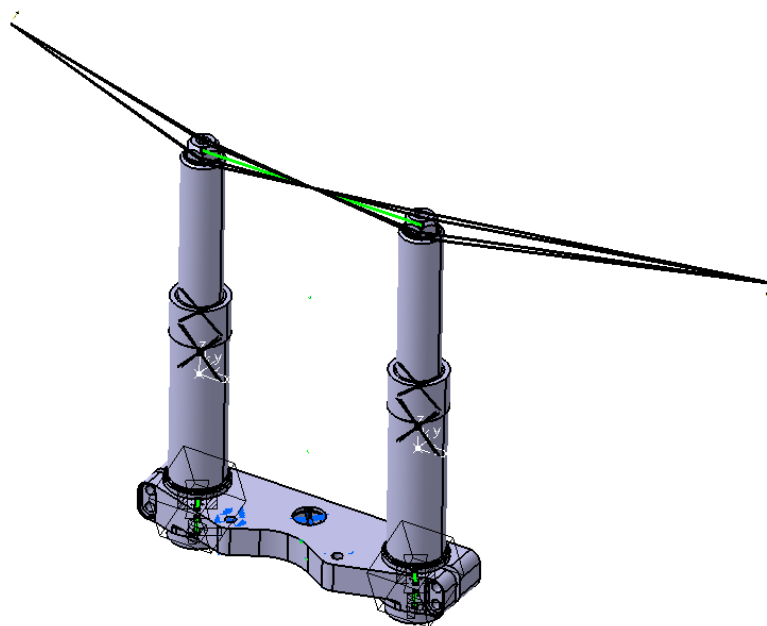


Figura 8.36: Subconjunto analizado.

Los mayores esfuerzos que sufre este conjunto se dan durante la transmisión del par de fuerzas del giro. El estudio de este conjunto no está centrado en la resistencia mecánica de sus elementos (debido a las pequeñas cargas sufridas) si no que se dirige a estudiar el desplazamiento de los nodos de cara a comprender mejor la rigidez del sistema de dirección.

Como se ha explicado anteriormente, la dirección tiene que transmitir con la mayor fidelidad posible las órdenes del piloto, es fácil imaginar, por tanto, que este requisito es incompatible con un sistema muy flexible. Es por ello que en este análisis se comprobará, principalmente, el desplazamiento de los nodos.

Al contrario que en el caso de la frenada, extraer el par aplicado a la dirección a partir de los datos obtenidos en los ensayos de extensometría es mucho más complejo, por lo que se ha recurrido a la literatura para estimar estos datos, donde aparecen unos valores máximo algo menores a 60 N·m.

- **Definición condiciones interfaces**

En este modelo se pueden encontrar tres interfaces distintas: los dos casquillos, que unen las dos botellas telescópicas entre sí, y la unión botella-tija.

Para modelar la unión entre botellas, se ha recurrido a uniones rígidas que permitan personalizar los grados de libertad.

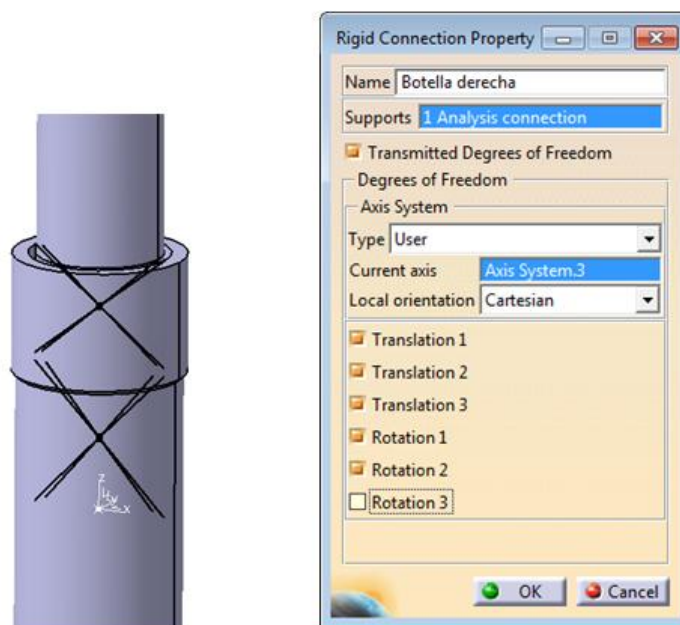


Figura 8.37: Detalle de las condiciones de interfase impuestas entre las botellas telescópicas.

Como se puede ver en la figura 8.38, a la hora de definir los grados de libertad, se ha usado un sistema de referencia con el eje Z paralelo al eje de revolución de las botellas. De esta manera, para simular la unión entre botellas se han restringido todos los grados de libertad, excepto el giro alrededor de Z. En la realidad, la unión entre botellas permite la traslación a

lo largo de Z, pero a la hora de simular el par de fuerzas alrededor del eje de dirección, ese grado de libertad no influye en el resultado, y sin embargo, ese grado de libertad adicional puede dar problemas de cara al cálculo informático.

Para la unión entre botella y tija se ha recurrido a una unión a presión, que simula el apriete que ejerce la tija sobre las botellas. Esta unión se ha modelado con una interferencia radial de 1 micra.

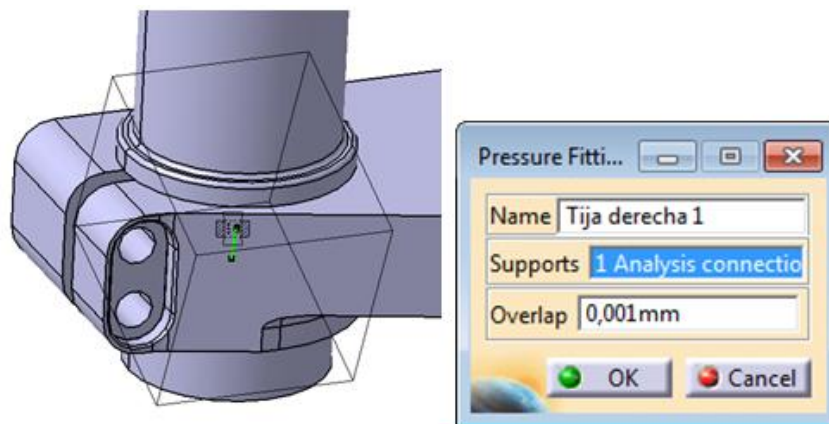


Figura 8.38: Detalle de las condiciones de interfase impuestas entre la botella inferior y la tija inferior.

Además de esto, se ha impuesto una unión rígida que restringe el movimiento relativo entre las cabezas de las botellas, este movimiento no sería fiel a la realidad ya que las cabezas están firmemente unidas por la tija superior y, en caso de permitirse, arrojaría unas cifras de rigidez mucho menores de las cifras reales.

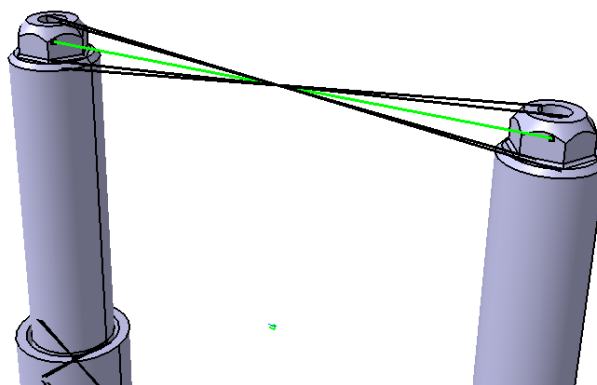


Figura 8.39: Unión rígida entre las dos cabezas de las botellas telescópicas, simulando el efecto de la tija superior.

- **Definición condiciones de frontera**

Para simular la unión entre la tija inferior y el mecanismo de suspensión, se ha introducido una condición de “deslizamiento” (*slider*) en el alojamiento del eje de la tija inferior. Esto permite que la tija gire, pero que no se desplace.

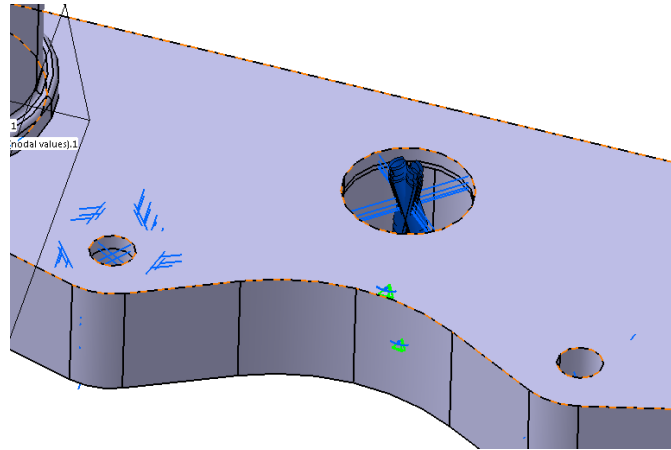


Figura 8.40: Representación de la condición slider impuesta en el alojamiento del eje.

Además, para simular el anclaje al resto de elementos del sistema de dirección, se ha usado un empotramiento en los agujeros a los que se atornilla la pletina de dirección.

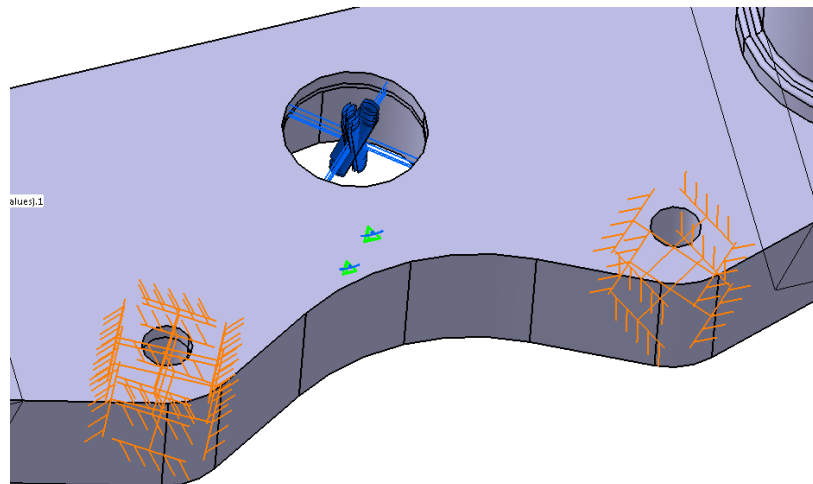


Figura 8.41: Representación gráfica de los empotramientos impuestos en los anclajes de la pletina de dirección.

- **Definición de cargas**

Al igual que en el caso del análisis de la tija, se ha recurrido a dos “virtual parts” que unen de forma infinitamente rígida el punto de aplicación de la carga (localizado en el extremo de cada semimanillar) con la cabeza de cada una de las dos barras telescópicas.

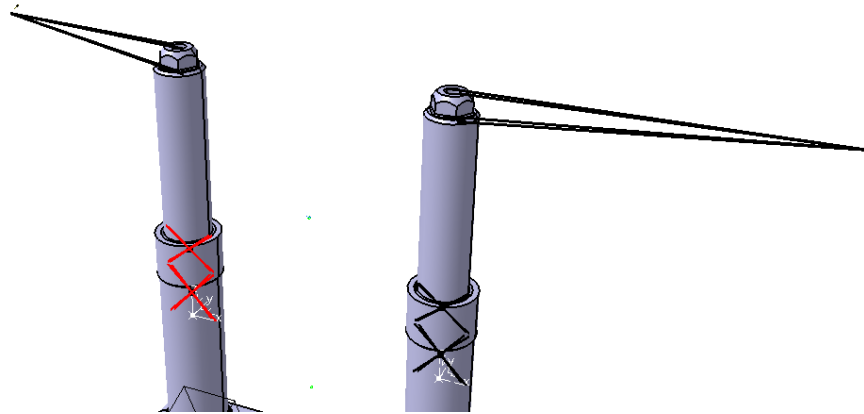


Figura 8.42: "Virtual parts" simulando los semimanillares.

Sobre estas "virtual parts" se han aplicado las máximas cargas que sufre la dirección en una curva.

Se tiene que el punto de aplicación de la fuerza está a 332 mm del eje de rotación del conjunto, por tanto, teniendo un par aplicado de 60 N·m, la fuerza sobre cada manillar es de:

$$F_{mani} = 60 \text{ N}\cdot\text{m} / (0,332 \text{ m} * 2 \text{ manillares}) = 90.36 \text{ N/manillar}$$

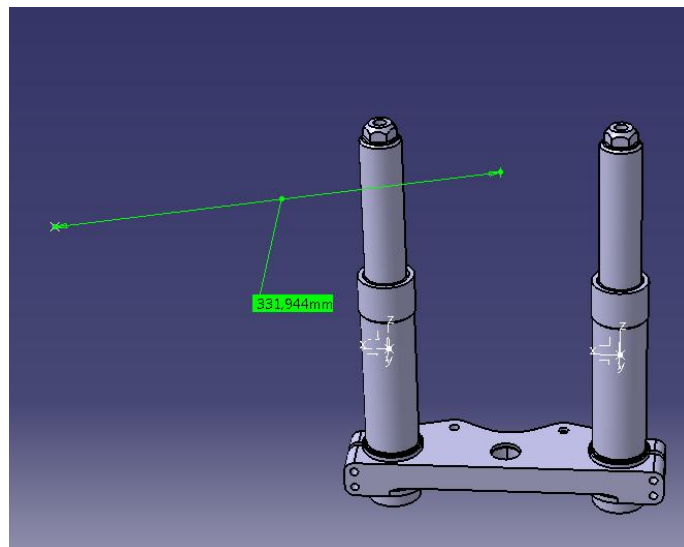


Figura 8.43. Distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de giro del conjunto.

Aplicando el factor de mayoración, se tiene una fuerza total:

$$F_{Total} = 90.36 * f_{mayo} = 135.54 \text{ N}$$

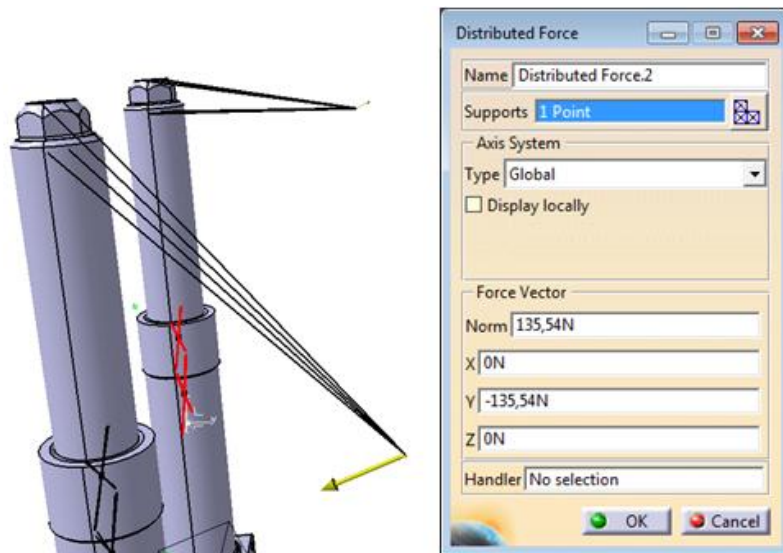


Figura 8.44: Detalle de la aplicación de la fuerza sobre los semimanillares.

- **Definición malla – elementos**

Este subconjunto comprende tres mallas distintas, las botellas superiores, las botellas inferiores y la tija inferior, cada una de estas tres mallas tiene características distintas.

Las botellas superiores y las inferiores tienen mallas con las mismas características: un tamaño de elemento de 2.5 mm y un flecha proporcional de 0.2.

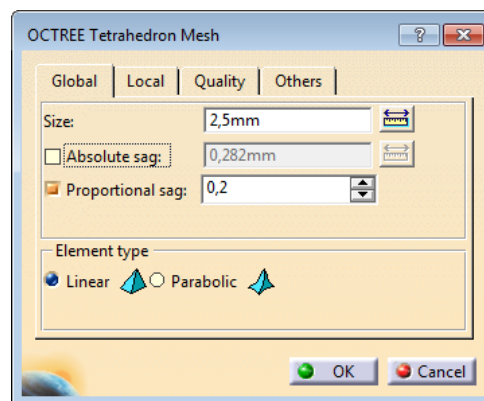


Figura 8.45: Detalle de la configuración de la malla de las botellas superiores e inferiores.

Para la tija inferior, se ha escogido una malla con elementos de 2.762 mm y una flecha absoluta de 0.522 mm.

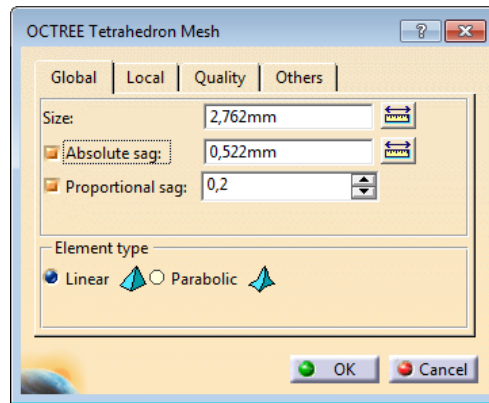


Figura 8.46: Detalle de la configuración de la malla de la tija.

Tras una primera simulación, se encontró un punto de concentración de tensiones en uno de los nervios de la tija. De manera que las zonas adyacentes a este punto se refinaron hasta un tamaño de 0,5mm y una flecha máxima de 0.1mm.

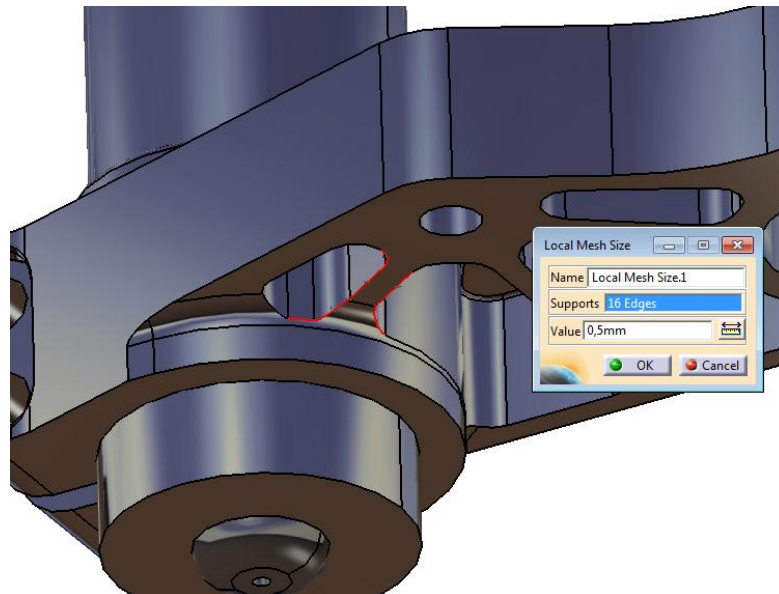


Figura 8.47: Detalle de la zona refinada y la configuración del refinado.

La malla final se muestra en la figura 8.49, con un detalle del refinado en la figura 8.50.

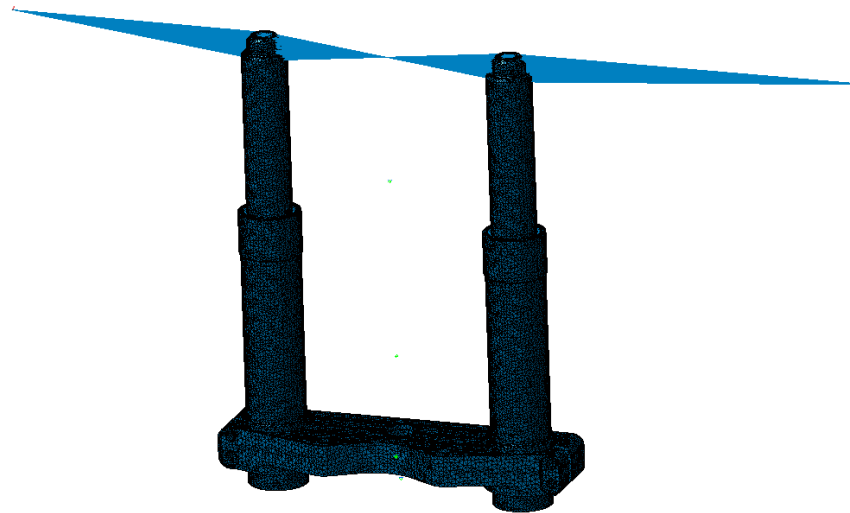


Figura 8.48: Malla final del subconjunto.

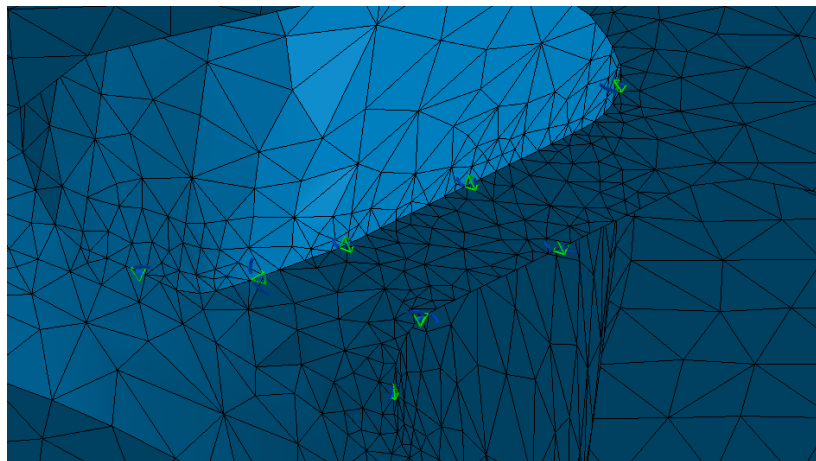


Figura 8.49: Detalle de la zona refinada.

- **Resultados**

Tras el análisis se obtuvo un valor máximo de tensión de 113 MPa.

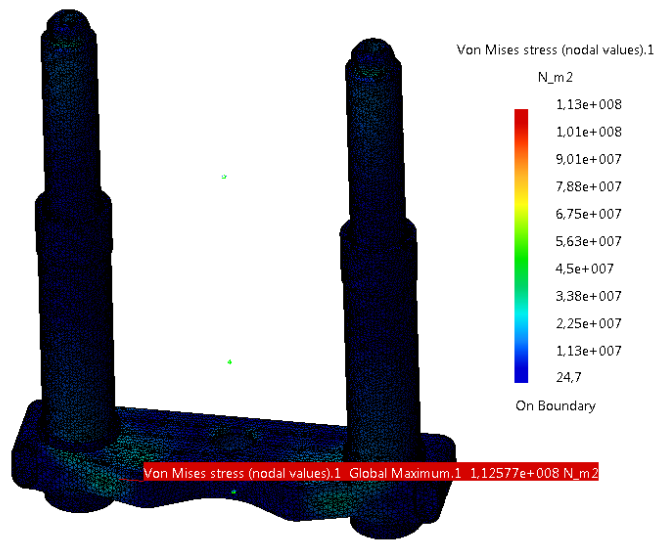


Figura 8.50: Representación gráfica de las tensiones sufridas por el subconjunto.

Este valor máximo se produjo en el nervio mencionado.

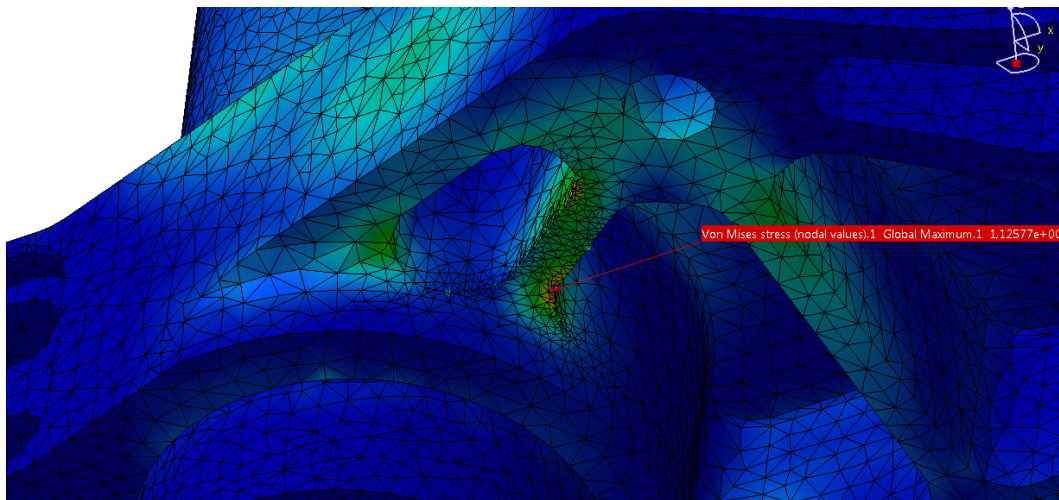


Figura 8.51: Detalle de la zona con mayor tensión.

Además, como ya se ha explicado, uno de los objetivos de este análisis era evaluar la rigidez del conjunto, para ello se calcularon los desplazamientos de los nodos. El máximo desplazamiento tiene lugar en el extremo de la “virtual part” que simula el semimanillar. En este punto se tiene un desplazamiento de 1.47 mm. Teniendo en cuenta que ese punto se encuentra a 332 mm del eje de giro, supone un ángulo de 0.28°.

$$\alpha = \arctg(1.5 \text{ mm} / 332 \text{ mm}) = 0.258^\circ$$

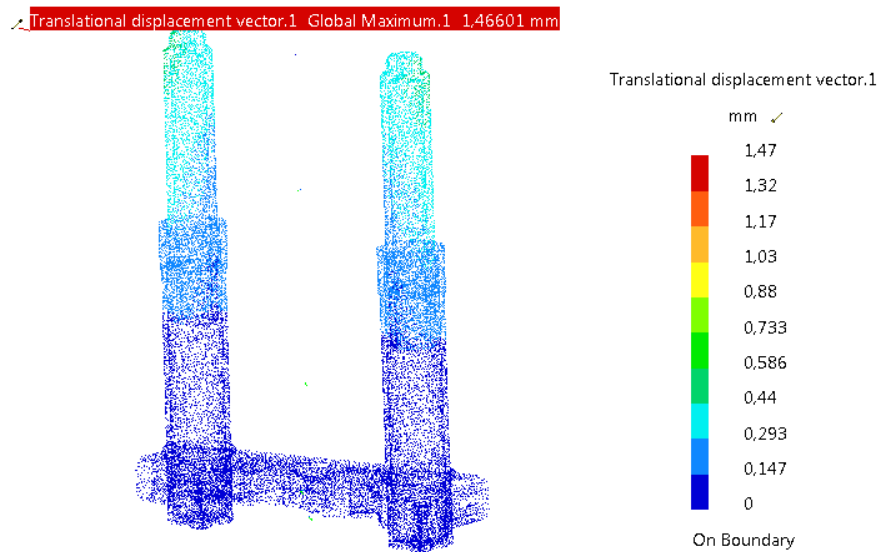


Figura 8.52: Representación cromática de los vectores de desplazamiento de cada uno de los nodos de la malla.

Teniendo en cuenta el pequeño ángulo girado por el conjunto cuando el piloto aplica el momento, y que las tensiones están por debajo del máximo requerido (250 MPa), se da por válido el sistema.

8.2.4. Horquilla de dirección (MT2-DI-03-01)

Para el estudio de la horquilla de dirección se van a estudiar tres casos de cargas distintos por separado. Estos tres casos corresponden con tres situaciones distintas que tienen lugar durante el funcionamiento de la motocicleta.

Por un lado, el principal esfuerzo para el que se ha concebido la pieza: Transmitir los esfuerzos de dirección. Por otro lado, el principal esfuerzo en términos de carga aplicada: el momento creado por las pinzas de freno. Y por último, el caso en el que una sacudida repentina de la dirección provoque una importante fuerza sobre el amortiguador de dirección, en este caso el análisis se centrará principalmente en la resistencia del anclaje de dicho amortiguador.

Este subconjunto está compuesto únicamente por la horquilla de dirección.

- **Definición condiciones interfaces**

Al tratarse de un subconjunto formado por una sola pieza no existe ninguna interfaz, sin embargo, existe una “virtual part” que actúa como buje, y es sobre la que se aplican las distintas cargas o condiciones de frontera según el análisis. Esta “virtual part” une de forma rígida el centro de la rueda con los anclajes de los tornillos que unen la horquilla a los

separadores.

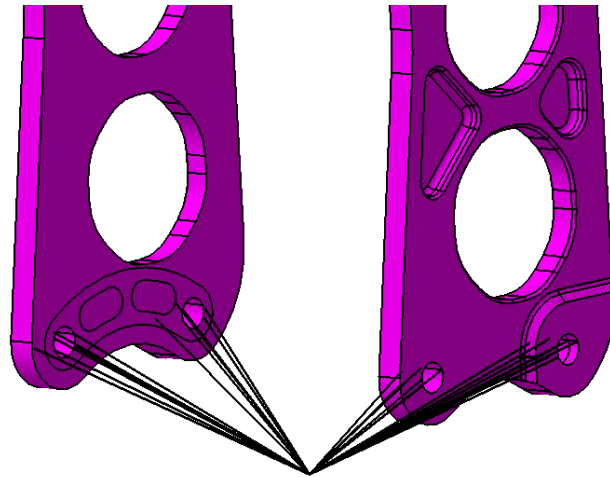


Figura 8.53: "Virtual part" simulando el buje.

- **Definición malla**

Para los tres análisis realizados, se ha usado la misma malla general con un tamaño medio de elementos de 4mm, y una flecha máxima permitida de 0,6mm o una flecha relativa de 0,2. Para cada uno de los análisis se ha refinado en un sitio o en otro dependiendo de la distribución de las fuerzas.

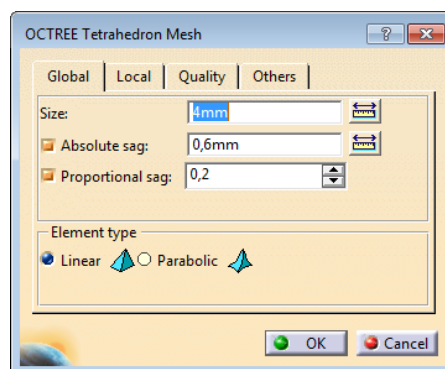


Figura 8.54: Detalle de la definición de la malla.

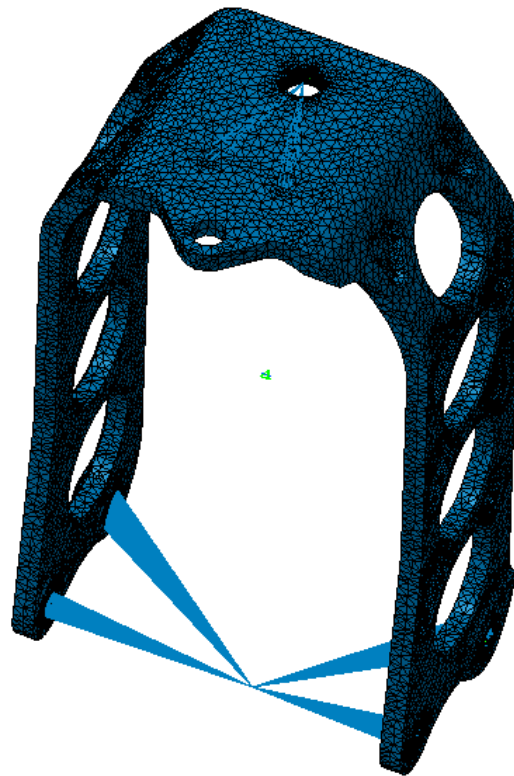


Figura 8.55: Malla final.

8.2.4.1. Transmisión del giro

Para conocer los esfuerzos sufridos durante la transmisión del giro, se ha supuesto el caso en el que el piloto tenga que ejercer el máximo momento alrededor del eje de dirección. Para simular este caso, se supone un empotramiento en la zona del buje, y se aplica un momento torsor alrededor del eje de dirección. El valor de este momento es el mismo usado para calcular el conjunto de botellas telescópicas, es decir, 60 N·m.

- **Definición condiciones de frontera**

Para modelar la idea del empotramiento en el buje, se ha impuesto un empotramiento en la “virtual part” que simula el buje.

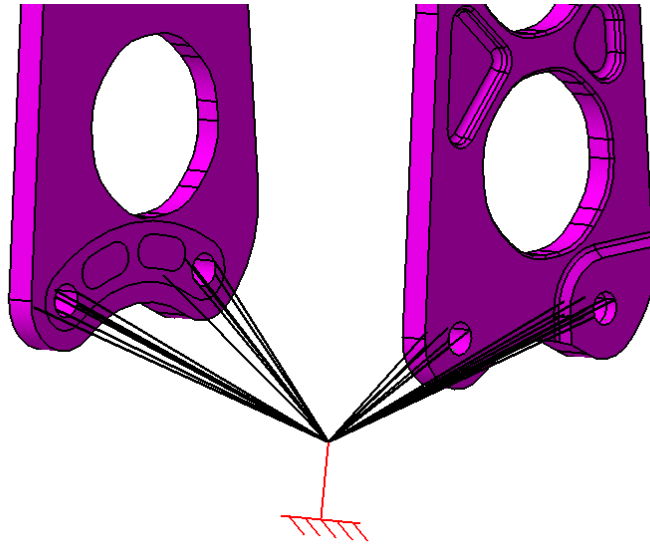


Figura 8.56: Empotramiento aplicado sobre la "virtual part" que define el buje.

Por otro lado, también se ha impuesto la condición de "slider" en el eje alrededor del que pivota la horquilla de dirección. Esta condición simula el eje que une la horquilla de dirección con la horquilla de suspensión.

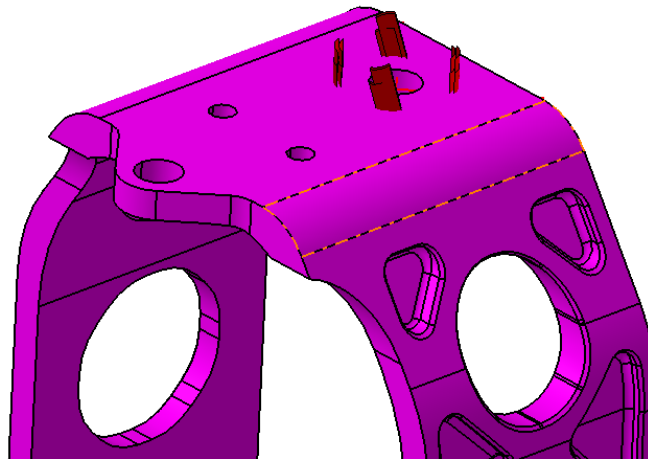


Figura 8.57: Representación gráfica de la condición de "slider" impuesta en el alojamiento del eje.

- **Definición de cargas**

Para simular el momento ejercido por el piloto en el manillar de dirección se ha hecho uso de una "virtual part" que representa la pletina de dirección que transmite el par de giro. De esta manera, el par de giro tiene su eje en el eje de dirección, pero se aplica, mediante una "virtual part" sobre los anclajes de la pletina de dirección.

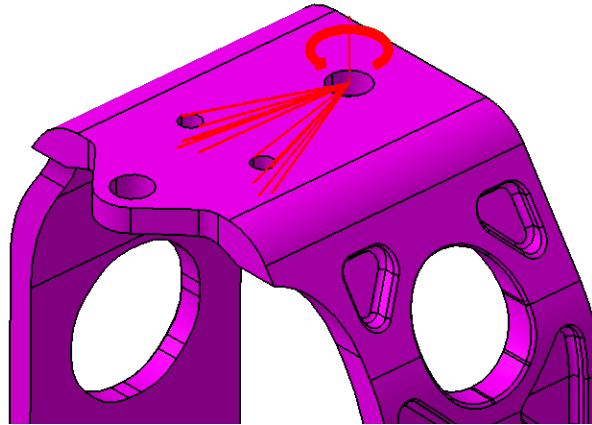


Figura 8.58: Momento aplicado alrededor del eje de dirección.

El momento final aplicado es el momento máximo que se ha supuesto (60 N·m) multiplicado por el factor de mayoración.

$$M_{Total} = 60 \text{ N}\cdot\text{m} * f_{mayo} = 90 \text{ N}\cdot\text{m}$$

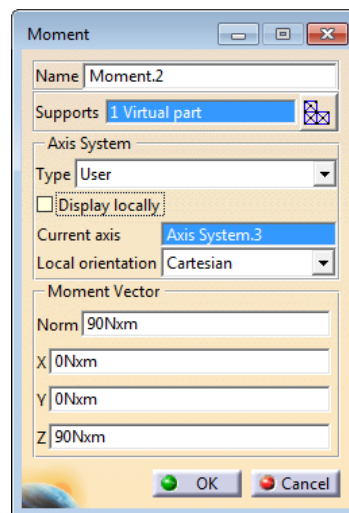


Figura 8.59: Detalle de la definición del momento aplicado.

- **Definición malla**

Tras un análisis con la malla estándar, se comprobó que las zonas de concentración de esfuerzos eran el eje de dirección y los cuatro anclajes de los tornillos que unen buje y horquilla de dirección. Además, también se producían concentraciones de esfuerzos en los anclajes de la pletina de dirección con la horquilla de dirección.

Después de varias comparaciones entre mallas, se llegó a la conclusión de que, en los puntos de mayor concentración de tensiones el compromiso óptimo entre tiempo de cálculo y fiabilidad de los resultados se alcanzaba refinando la malla hasta un tamaño medio de

0.5mm y una flecha máxima de 0,1mm.

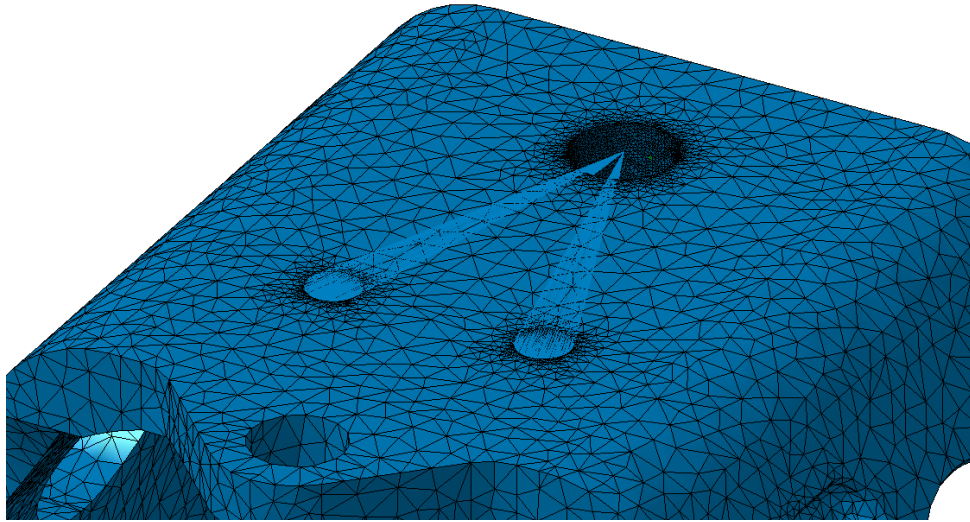


Figura 8.60: Detalle del refinado en el alojamiento del buje.

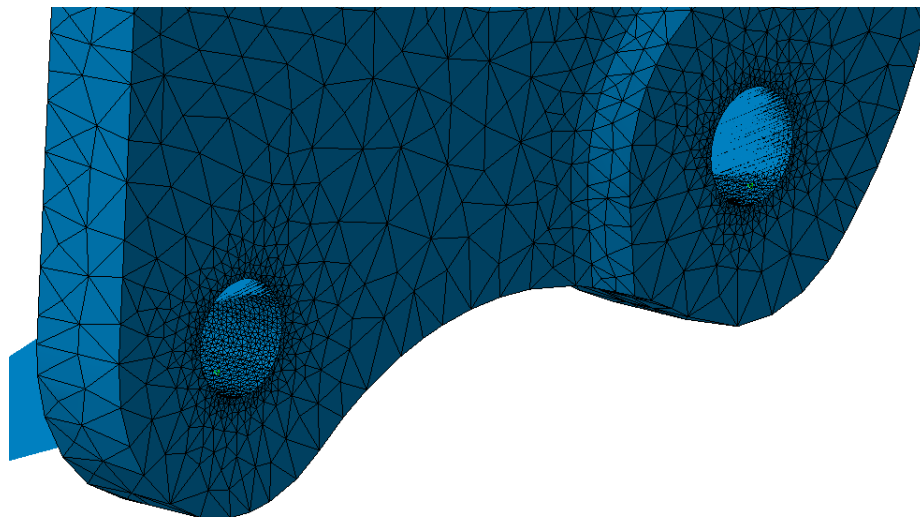


Figura 8.61: Detalle del refinado en los anclajes de la horquilla de dirección.



Figura 8.62: Configuración del refinado.

- **Resultados**

El análisis de elementos finitos realizado arroja una tensión máxima en la pieza de 57.5 MPa.

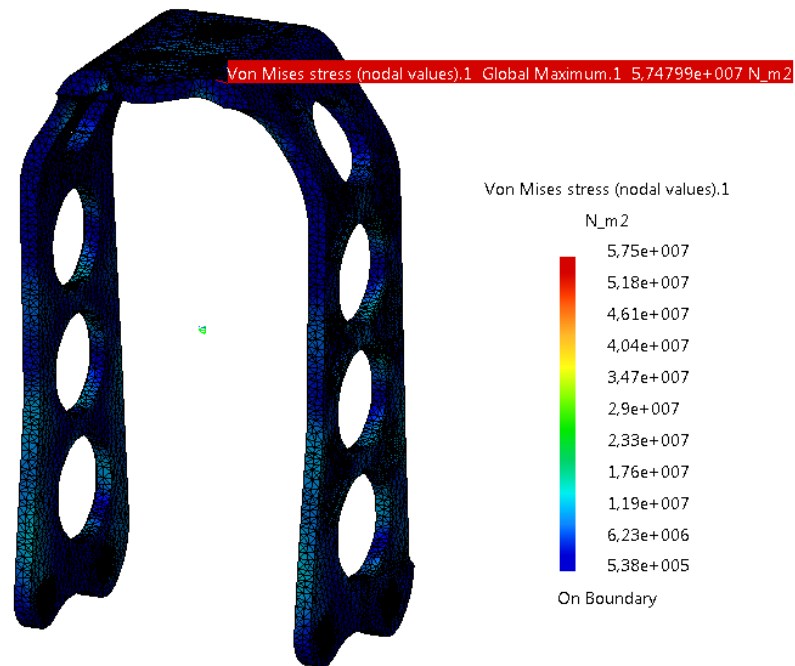


Figura 8.63: Representación gráfica de las tensiones sufridas por la pieza.

El esfuerzo máximo tiene lugar en el agujero del anclaje de la pletina de dirección.

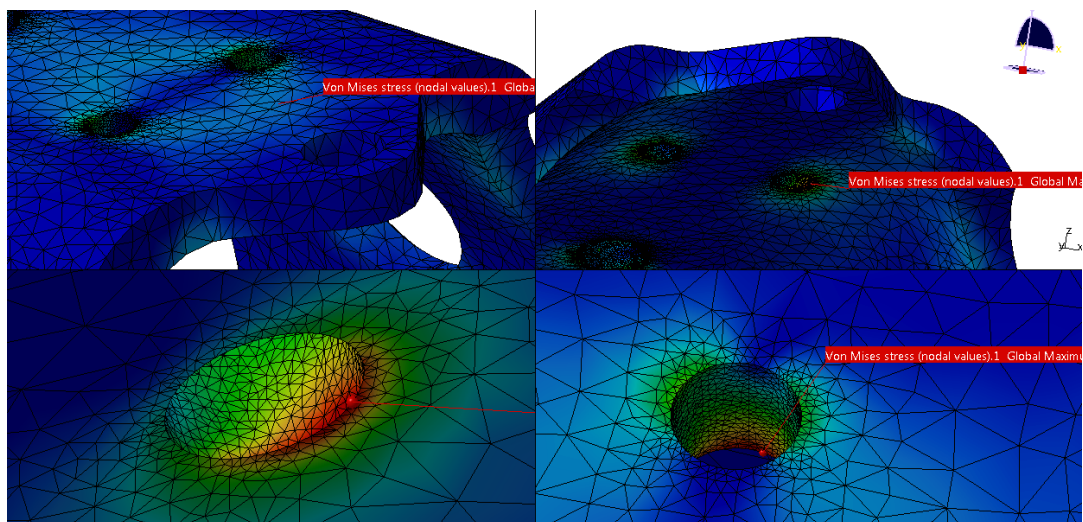


Figura 8.64: Detalle de las zonas con mayor tensión. Arriba, una vista general de la zona. Abajo, una vista particular de la malla en dicho punto.

También es importante comprobar el ángulo torsionado por la pieza de cara a comprender la rigidez del conjunto de dirección. Para ello, partimos de que el punto que sufre mayor desplazamiento se mueve 0.207 mm, y que está alejado del eje de rotación 99.612 mm. De

manera que:

$$\alpha = \arctg (0.207\text{mm} / 99.612\text{mm}) = 0,119^\circ$$

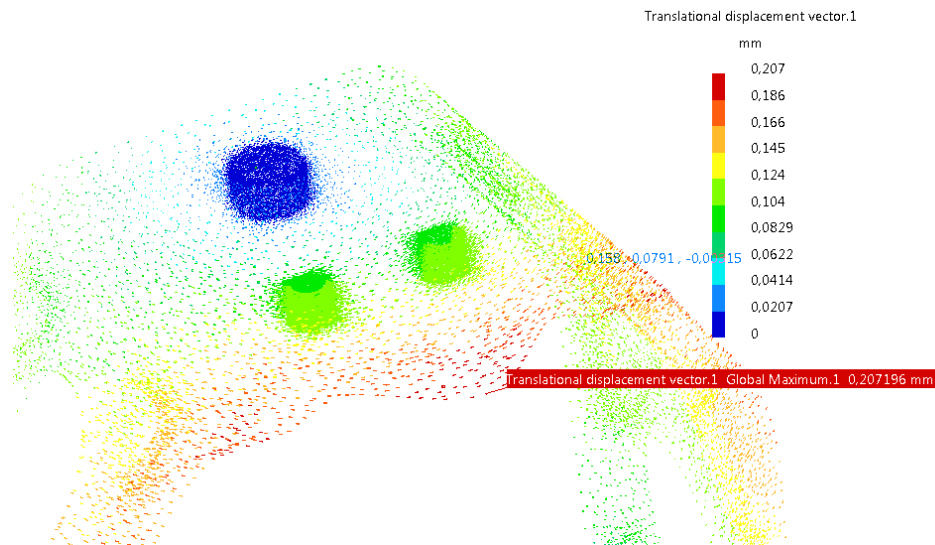


Figura 8.65: Representación gráfica de los vectores del desplazamiento de los nodos de la malla.

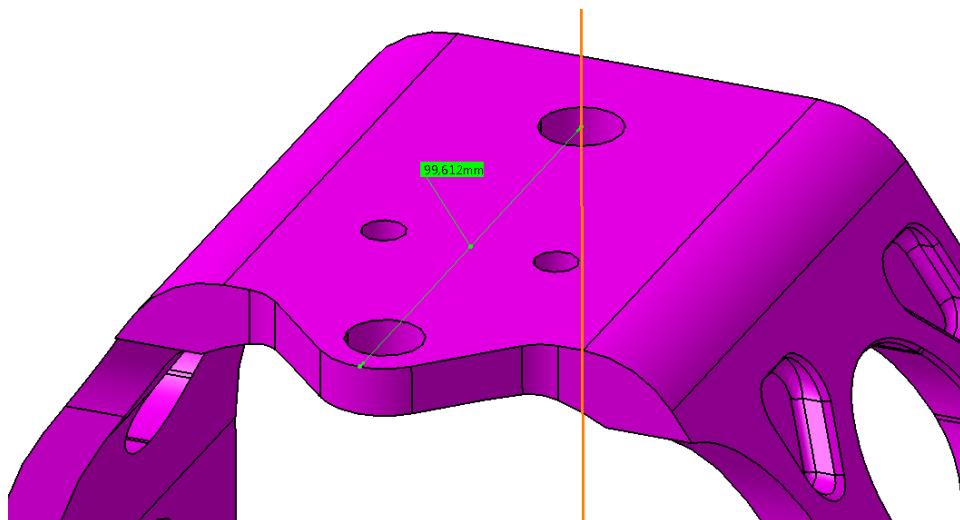


Figura 8.66: Distancia desde el nodo de mayor desplazamiento hasta el eje de giro.

8.2.4.2. Esfuerzos durante la frenada

Para simular los esfuerzos durante la frenada se ha eliminado el empotramiento que sujetaba el buje, y se ha sustituido por unas restricciones personalizables de los grados de libertad. De manera que se han restringido todos los desplazamientos y únicamente se ha permitido el giro alrededor del eje de la rueda.

Para simular el par de frenado, se ha impuesto un momento alrededor del eje de la rueda. Siguiendo las indicaciones del fabricante del sistema de frenado, se ha usado un par de frenado de 600 N·m.

- **Definición condiciones de frontera**

Para simular las condiciones de buje, se ha aplicado una restricción personalizada sobre la “virtual part” que lo simula. Para ello, se han restringido todos los grados de libertad excepto el giro alrededor del eje de la rueda (eje x del sistema de referencia global).

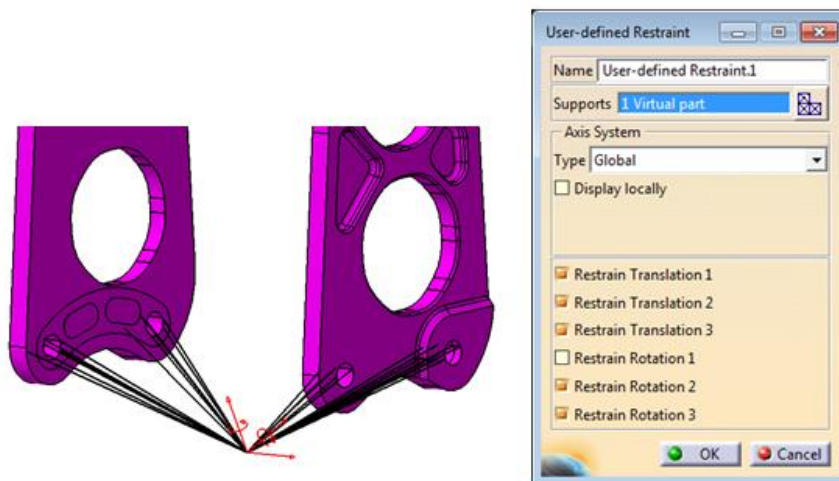


Figura 8.67: Detalle de las condiciones de frontera impuestas en la “virtual part” que simula el buje.

Además, para modelar el eje de dirección que une la horquilla de dirección con la horquilla de suspensión, se ha hecho uso de un “slider” en el alojamiento de dicho eje exactamente igual que en el caso de la simulación del par de giro.

Además, en un principio se barajó la idea de imponer un empotramiento en la “virtual part” que simula la pletina de dirección. Sin embargo, se llegó a la conclusión de que esta condición no sería realista, ya que la pletina de dirección es muy flexible. Además, imponer ese empotramiento estaría reduciendo la tensión calculada en la zona del eje de dirección, lo que arrojaría unos resultados de tensión menores de los reales. Por tanto, se desechó la idea de introducir ese empotramiento, y se dejó un movimiento libre en esa zona.

- **Definición de cargas**

Para el modelado del momento creado por los frenos, se ha impuesto un momento alrededor del eje de la rueda (eje x en el sistema de referencia global).

Para calcular este valor se ha partido de los 600 N·m que indica el fabricante y se ha multiplicado por el factor de mayoración.

$$M_{Total} = 600 \text{ N}\cdot\text{m} * f_{mayo} = 900 \text{ N}\cdot\text{m}$$

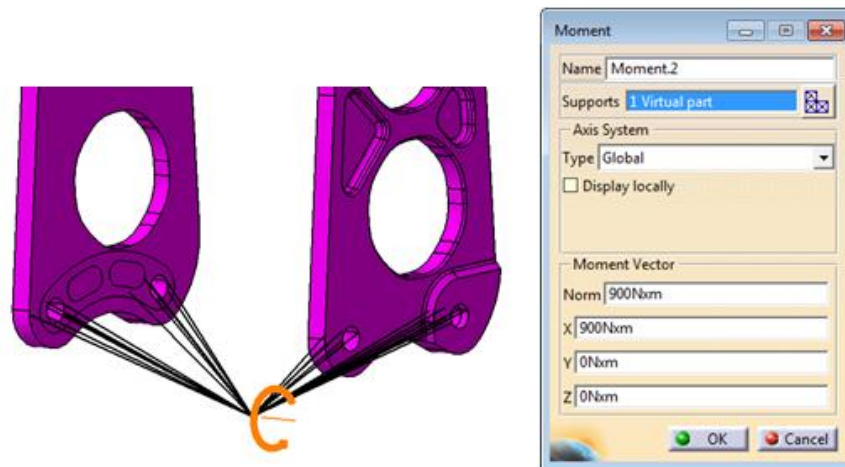


Figura 8.68: Detalle de las cargas aplicadas sobre la "virtual part" que simula el buje.

- **Definición malla**

Después de lanzar el modelo usando una malla sin ningún refinamiento, se comprobó que los puntos de concentración de tensiones eran los mismos que en el caso del par de dirección excepto los anclajes de la pletina de dirección. Por ello, se usaron los mismos refinamientos, excepto el refinamiento en los anclajes de la pletina de dirección.

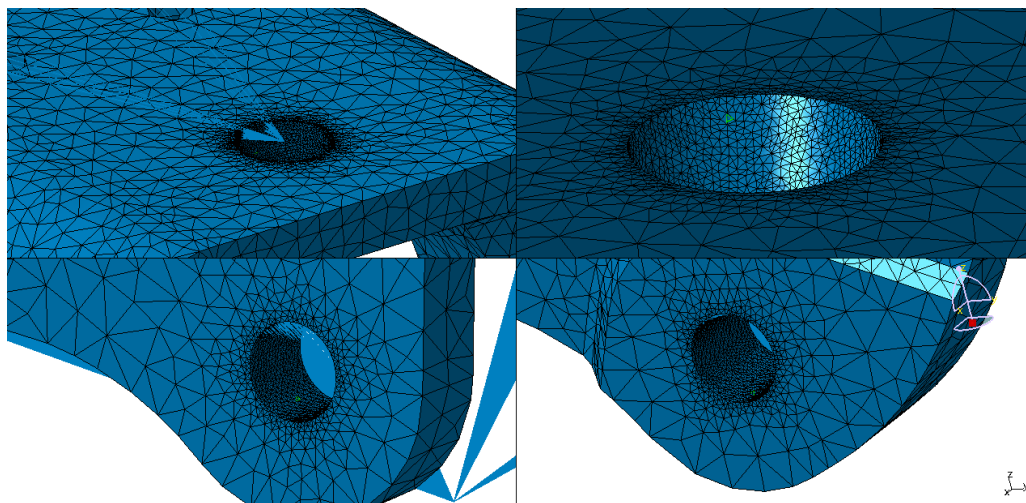


Figura 8.69: Detalle de las zonas refinadas. Arriba el alojamiento del eje. Abajo los anclajes al buje.

Figura XX: detalle de los concentradores de tensiones. En la parte de arriba vistas superior e inferior del eje de dirección. Abajo a la izquierda, anclaje delantero de los tornillos, abajo a la derecha anclaje trasero de los tornillos.

- **Resultados**

Una vez lanzados los cálculos, el programa arroja los siguientes resultados.

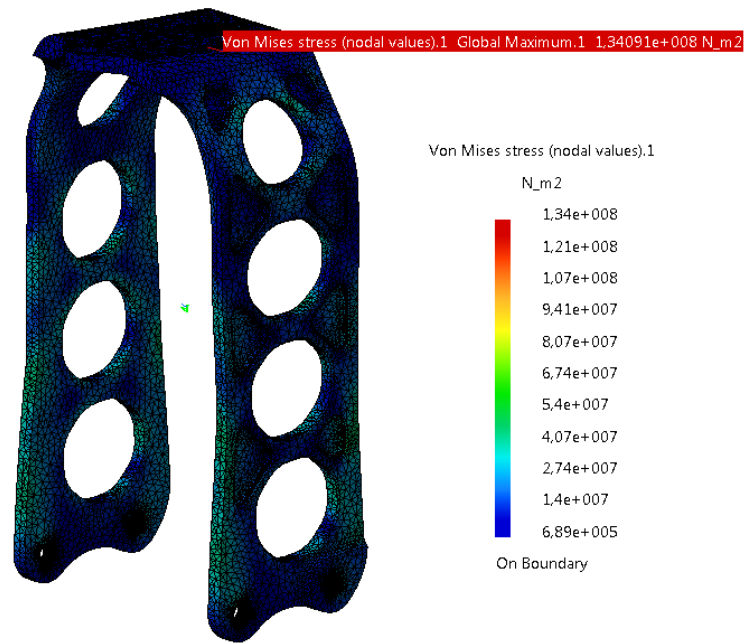


Figura 8.70: Representación gráfica de las tensiones sufridas por la pieza durante la frenada.

Como se puede ver, el valor de la tensión está por debajo de los 250 MPa que se consideran como aceptables. Además, tal y como se puede ver, el punto de máxima tensión tiene lugar en la zona inferior del anclaje al eje de dirección.

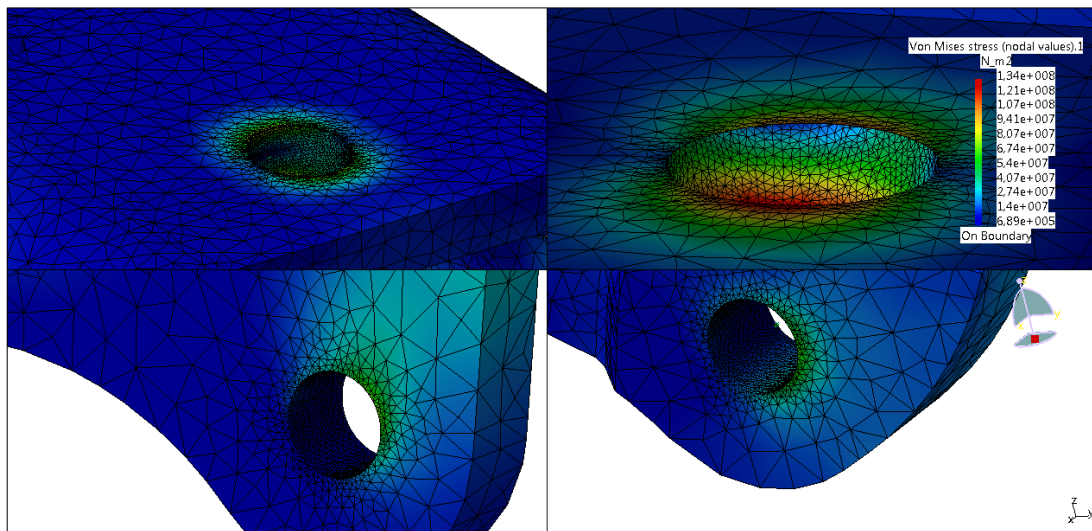


Figura 8.71: Detalle de las tensiones sufridas en las zonas refinadas.

Figura XX: detalle de las tensiones sufridas en los concentradores de tensiones. En la parte de arriba vistas superior e inferior del eje de dirección. Abajo a la izquierda, anclaje delantero de los tornillos, abajo a la derecha anclaje trasero de los tornillos.

Por tanto, desde el punto de vista de los esfuerzos sufridos durante la frenada, se considera que la horquilla de dirección es válida.

8.2.4.3. Esfuerzos del amortiguador de dirección

Para comprender el motivo de este análisis, es importante recordar que la idea de un amortiguador de dirección es oponerse frente a un par de fuerzas originado en la huella de contacto del neumático. Por ello, hay dos aspectos de vital importancia para calcular durante el trabajo de un amortiguador de dirección: por un lado calcular si el soporte aguanta los esfuerzos, y por otro, calcular si la flexión de la horquilla de dirección permite que la rueda se desvíe de su trayectoria sin que el piloto ejerza ningún movimiento en el manillar.

El principal problema encontrado a la hora de plantear el análisis ha sido el desconocimiento de los valores que pueden llegar a alcanzar los pares de fuerzas generados en la huella del neumático. Sin embargo sí que se disponen de datos del amortiguador de dirección que, según indica el fabricante, durante un uso normal puede llegar a soportar unos esfuerzos máximos de 1000 N.

- **Definición condiciones de frontera**

Para poder simular el trabajo del amortiguador de dirección conociendo únicamente el valor de los esfuerzos que soporta, se han usado las mismas condiciones de frontera que en el caso de un momento aplicado sobre la dirección (apartado 8.2.4.1). Se ha empotrado el buje, y se ha impuesto la condición de “slider” en el eje de dirección, dejando libre movimiento en los anclajes de la pletina de dirección (tal y como si el piloto no estuviera sujetando el manillar).

- **Definición de cargas**

La carga aplicada responde al esfuerzo máximo soportado por el amortiguador según indica el fabricante (1000N). Para ello se ha recurrido a una fuerza aplicada por un casquillo virtual.

De nuevo, la carga aplicada finalmente es:

$$F_{Total} = 1000N * f_{mayo} = 1500N$$

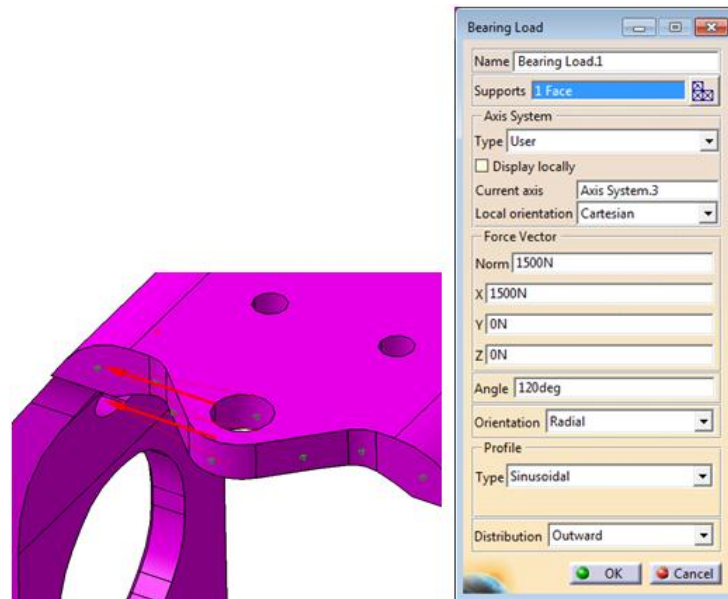


Figura 8.72: Carga aplicada en el anclaje del amortiguador de dirección.

- **Definición de la malla.**

Tras un primer análisis, se encuentra que las mayores cargas tienen lugar en el eje de dirección y en los anclajes entre horquilla y separadores. Sin embargo, para comprobar también los esfuerzos en la zona del anclaje del amortiguador, esa zona también ha sido refinada.

De forma que se han refinado los mismos lugares que en el caso de la frenada (apartado 8.2.4.2) y se ha añadido un refinamiento extra en la zona del anclaje del amortiguador de dirección.

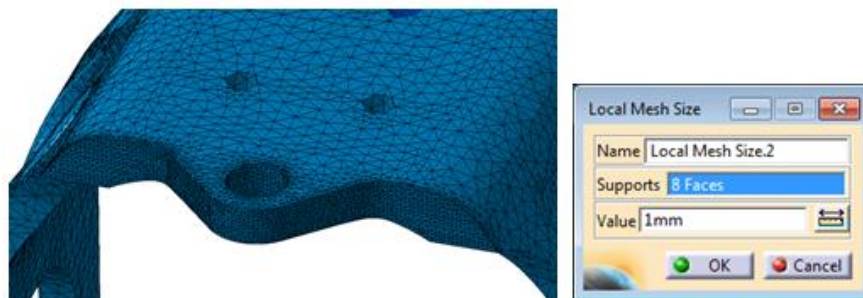


Figura 8.73: Refinado de la malla en el anclaje del amortiguador de dirección.

- **Resultados**

Una vez realizados los cálculos del modelo, se obtiene que la mayor tensión tiene lugar en el eje de dirección y toma un valor de 57.6 MPa.

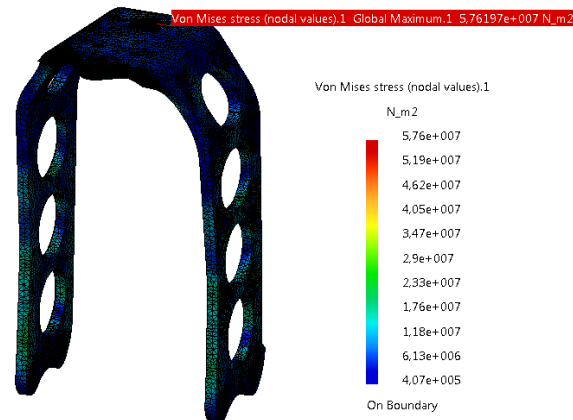


Figura 8.74: Representación gráfica de las tensiones sufridas por la horquilla de dirección.

Como se puede apreciar en la figura. 8.76, el punto de mayor tensión está localizado en el alojamiento del eje de dirección.

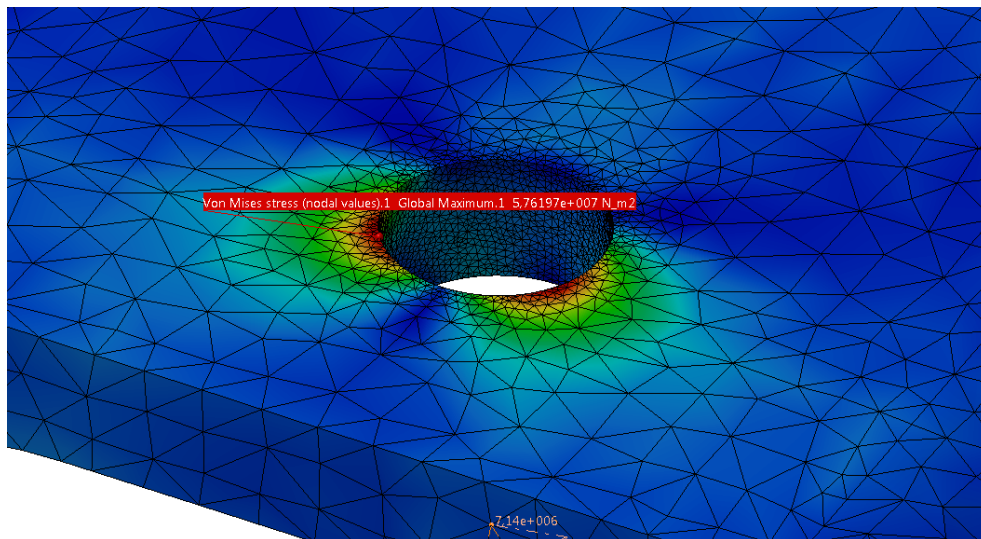


Figura 8.75: Detalle de la zona que sufre mayores tensiones.

Mientras que la zona de interés, el anclaje del amortiguador sufre unas tensiones máximas de 35.4 MPa únicamente.

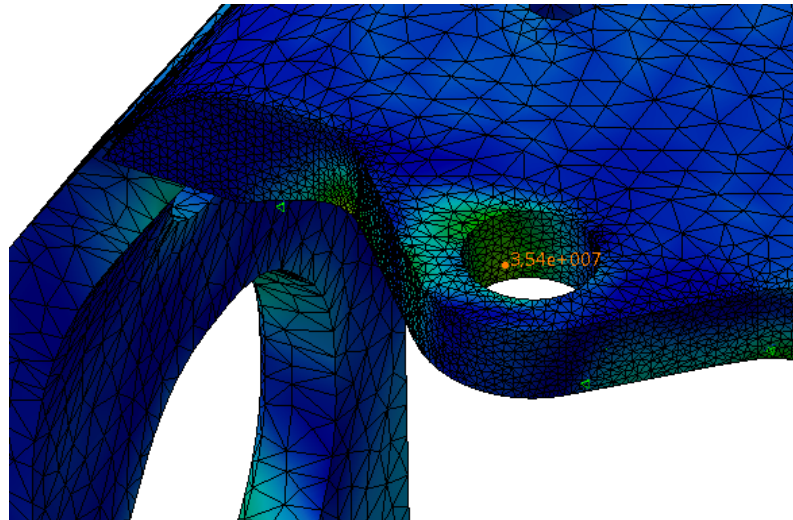


Figura 8.76: Detalle de las tensiones en el anclaje del amortiguador de dirección.

En cuanto al desplazamiento de los nodos, se obtiene que el desplazamiento máximo es de 0.3mm.

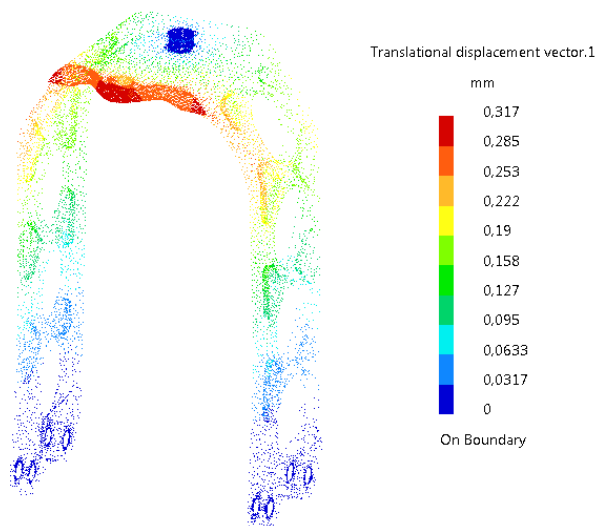


Figura 8.77: Representación de los vectores de desplazamiento de los nodos de la malla.

Tal y como se puede ver en la figura 8.67, la distancia entre el eje de dirección y el punto de máximo desplazamiento es de 99.612 mm. Esto significa que el ángulo girado por la horquilla de dirección en ese punto era de:

$$\alpha = \arctg (0.317\text{mm} / 99.612\text{mm}) = 0,182^\circ$$

De aquí puede desprenderse que la horquilla de dirección apenas sufre deformación tangencial a lo largo de su estructura, y el amortiguador de dirección permitirá que la rueda

no se mueva sin control ante las perturbaciones del asfalto.

Se ha comprobado, por tanto, la validez en todas las circunstancias de funcionamiento posibles de la horquilla de dirección diseñada.

8.2.5. Buje (MT2-DI-04-00)

El buje es uno de los elementos críticos de la dirección, ya que soporta unos grandes esfuerzos, principalmente durante el proceso de frenada. Por un lado, es el primer elemento que soporta el momento producido por las pinzas de freno, además, también tiene que soportar las fuerzas verticales que se producen debido a la transferencia de pesos, que como ya se ha visto puede llegar a ser el 100%, y también tiene que soportar las fuerzas horizontales debidas a las fuerzas de inercia.

Durante la frenada, todas estas fuerzas se combinan produciendo grandes sollicitaciones en el buje.

- **Definición condiciones de frontera**

Para simular las condiciones reales de trabajo del buje se ha recurrido a un elemento “*slider*” que simula el eje de dirección. Como se puede ver en la figura 8.79, el buje se apoya sobre el eje de dirección sobre un rodamiento (en naranja).

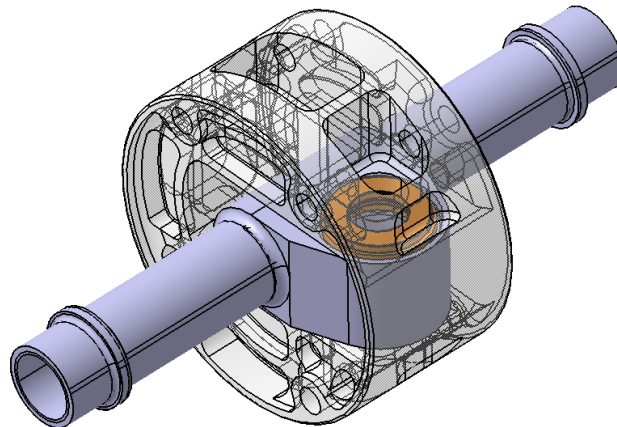


Figura 8.78: Detalle del apoyo entre buje y eje de dirección.

De manera que la condición slider se impone sobre la superficie de ese rodamiento, y sobre el alojamiento del eje.

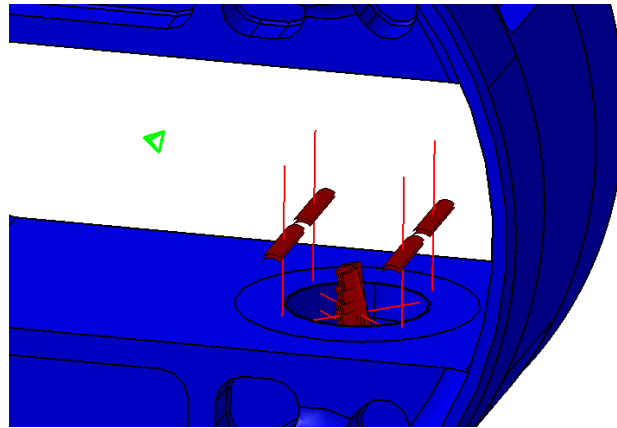


Figura 8.79: Condición de slider aplicado sobre el eje de dirección y el apoyo del mismo en el buje.

Además, para simular la reacción que la pletina de dirección ejerce sobre el buje cuando soporta los esfuerzos de frenada, se unen los alojamientos de los tornillos con el eje de la pletina de dirección mediante una “virtual part” infinitamente rígida.

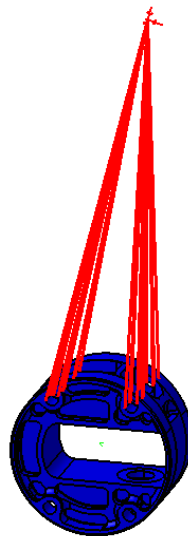


Figura 8.80: "Virtual part" simulando la horquilla de dirección.

A la hora de hacer los cálculos, esta unión tan rígida está aumentando el valor de la tensión máxima por encima del valor real. Sin embargo, debido a la dificultad que supondría modelar una unión real entre pletina de dirección y buje, y para mantener la pieza dentro de unos márgenes de seguridad, se ha preferido mantener esta unión mediante una “virtual part”.

El alojamiento del eje de la pletina de dirección se ha modelado mediante una herramienta que permite al usuario configurar los grados de libertad restringidos y los grados de libertad permitidos. Se han restringido todas las rotaciones, incluida la rotación alrededor del eje de dirección (se supone que durante la frenada, el piloto sujeta firmemente el manillar). Y únicamente se ha permitido el movimiento en el eje vertical, ya que, en la práctica quien realmente limita este movimiento es el eje de dirección, puesto que la pletina de es mucho

más flexible en esa dirección. De nuevo, limitar ese grado de libertad supondría obtener unas tensiones mayores de las reales.

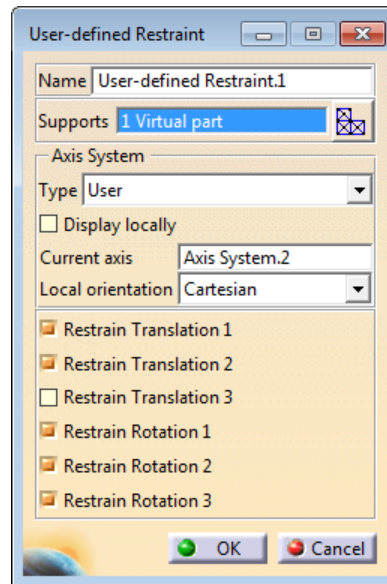


Figura 8.81: Configuración de la condición de contorno aplicada.

- **Definición de cargas**

Para simular el esfuerzo de frenada, se ha recurrido, de nuevo, a dos “virtual parts” que unen la pieza con el punto de aplicación de la fuerza. En este caso, unen los alojamientos de los tornillos de sujeción de las pinzas de freno con el punto de aplicación de la fuerza de las pinzas de freno.

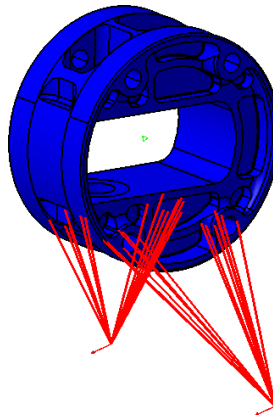


Figura 8.82: Modelado de las pinzas de freno con “virtual parts” y las cargas que éstas aplican sobre el buje.

Sabiendo que las pinzas en total ejercen un par de frenada de 600 N·m, y que el punto de aplicación de las fuerzas está localizado a 128.5 mm del eje de la rueda, se tiene que las pinzas ejercen una fuerza tangencial de:

$$F_{Total} = \text{Momento}/\text{distancia} = 4669,26 \text{ N}$$

Esta fuerza hay que repartirla entre ambas pinzas, lo que da lugar a

$$F_{pinza} = F_{Total} / n_{pinzas} = 2334,63 \text{ N/pinza}$$

Multiplicando esta cifra por el factor de mayoración de las cargas, se obtiene una fuerza de:

$$F_{aplicada} = 2334.63 * f_{mayo} = 3500 \text{ N}$$

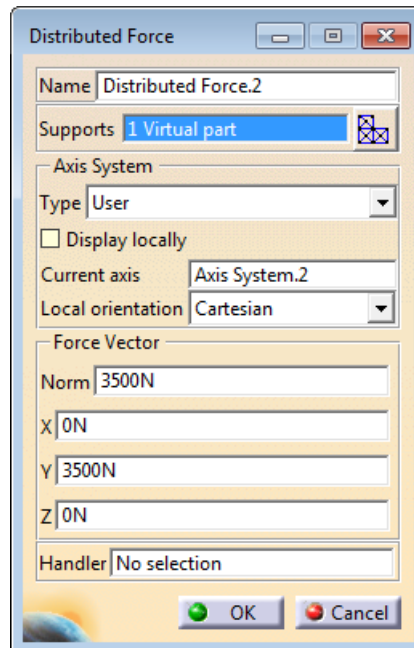


Figura 8.83: Configuración de la carga aplicada sobre las pinzas de freno virtuales.

Para simular los esfuerzos que ejerce la llanta sobre el buje, se aplican unas fuerzas distribuidas sobre las pistas de los rodamientos. El propio programa ofrece la posibilidad de simular la distribución de esfuerzos que tiene lugar en un contacto radial.

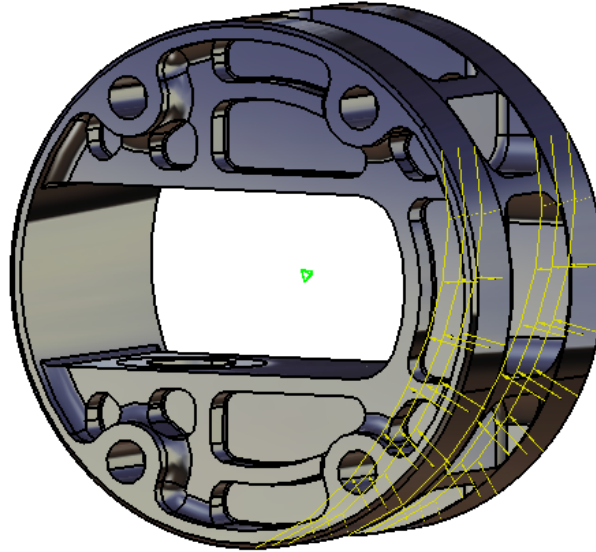


Figura 8.84: Carga radial en el apoyo de los rodamientos.

Para calcular las fuerzas distribuidas se ha supuesto una masa del conjunto motocicleta-piloto de 220 kg (150 kg + 70 kg). De esta forma, y suponiendo que hay una transferencia de pesos del 100%, se tiene:

$$F_{Total_y} = 220 \text{ kg} * 9.8 * 1.5 = 3234 \text{ N}$$

En cuanto a los esfuerzos en sentido horizontal, tal y como aparece explicado en el apartado de ensayos en pista, la máxima deceleración registrada fue de 1.25 G's. Por lo tanto:

$$F_{Total_x} = 220 \text{ kg} * 9.8 * 1.25 * 1.5 = 4042.5 \text{ N}$$

Como esta fuerza está repartida entre dos rodamientos, cada uno de las cargas soportará la mitad de los valores calculados.

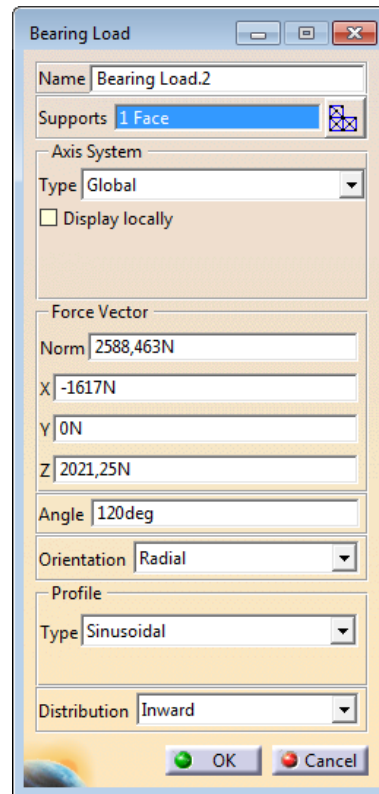


Figura 8.85: Definición de las cargas radiales aplicadas sobre el buje.

- **Definición malla – elementos**

Debido a la importancia del análisis del buje de cara al rendimiento de la motocicleta y a la seguridad e integridad del piloto. La malla se ha realizado usando elementos parabólicos. Estos elementos parabólicos (de 10 nodos) predicen con mucha mayor precisión los comportamientos reales de las piezas, sin embargo requieren un mayor tiempo de cálculo.

Por ello, se ha recurrido a elementos con un tamaño medio de 3mm, y con una flecha nula. Gracias a que los elementos parabólicos pueden tener aristas curvas, es posible anular la flecha.

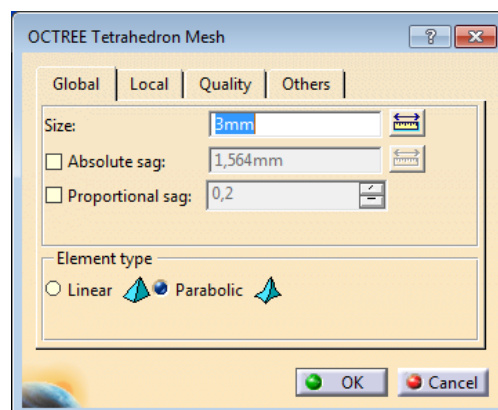


Figura 8.86: Definición de la malla.

Por tanto, la malla final ha adoptado el siguiente aspecto:



Figura 8.87: Malla final.

Además, en la zona en la que el rodamiento de dirección apoya en el buje, se ha refinado la malla, hasta tener elementos de 2mm.

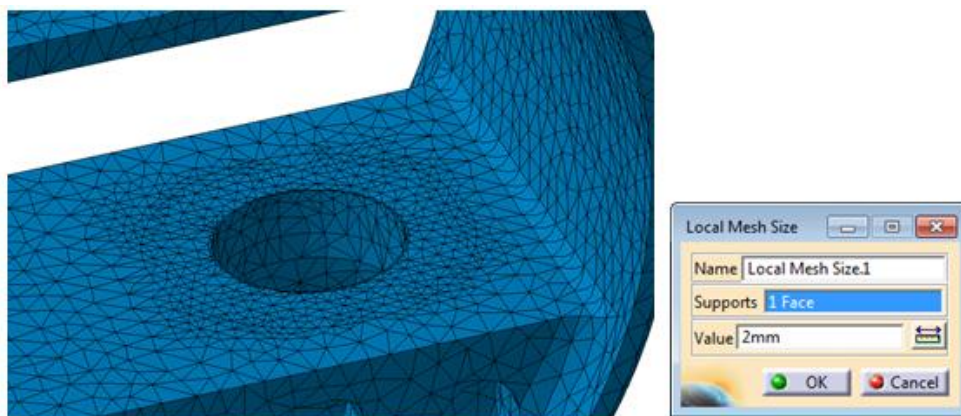


Figura 8.88: Refinado de la malla en el apoyo del eje de dirección.

- **Resultados**

Tras lanzar las simulaciones, se ha obtenido una tensión máxima de 124 MPa, por lo que queda comprobado que el buje cumple los criterios de tensión adoptados y se da por válido.

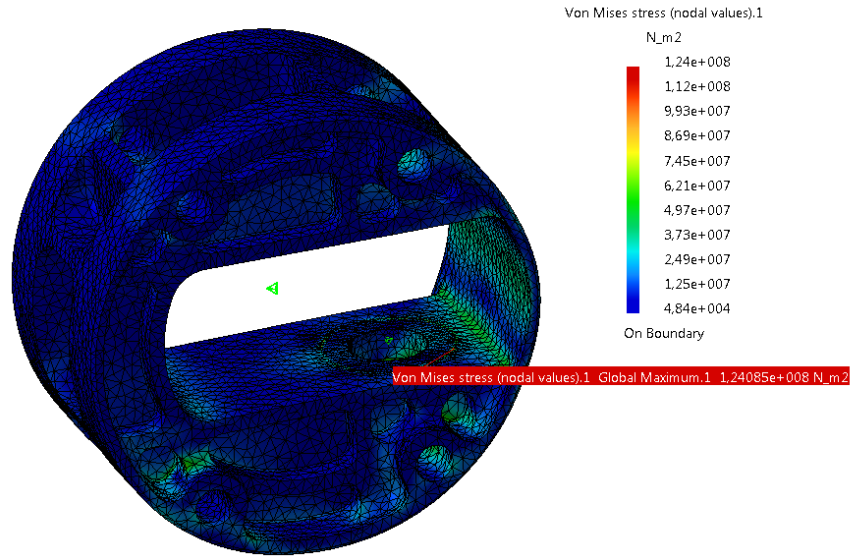


Figura 8.89: Representación gráfica de las tensiones sufridas por el buje.

Se puede ver que la máxima tensión tiene lugar en el contorno del apoyo del rodamiento de dirección. Es importante hacer notar que, debido a las características de la condición de contorno impuesta, en ese borde se produce un concentrador de tensiones que no se corresponde con la realidad. Esto se produce porque la condición “slider” que restringe el movimiento en dirección normal a la superficie desaparece súbitamente lo que equivale a apoyar un rodamiento con una arista viva. Sin embargo, en la realidad, el rodamiento usado tiene un radio de acuerdo mayor de cero, por lo que esta tensión será menor.

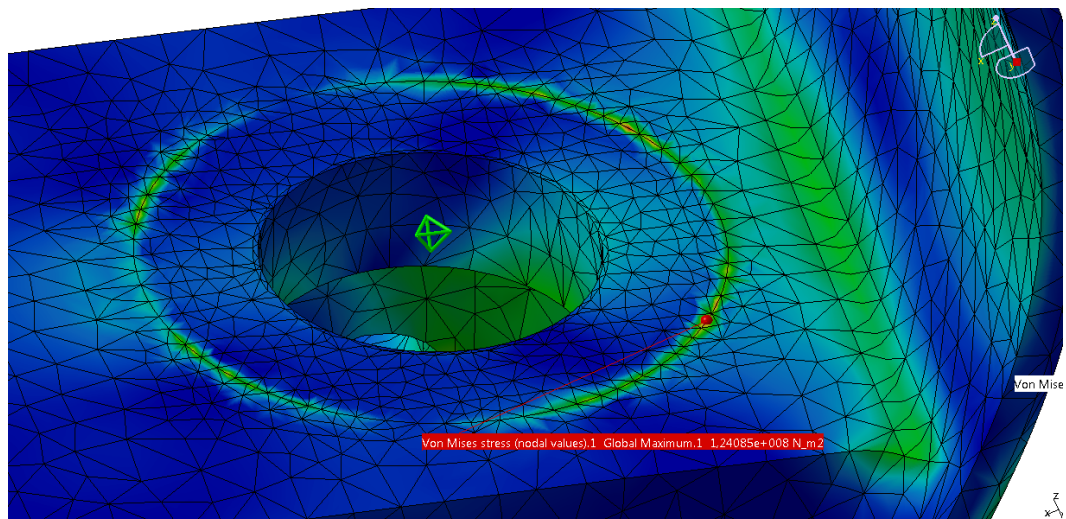


Figura 8.90: Detalle de las máximas tensiones sufridas.

Como se ha comprobado a lo largo del presente apartado, todas las piezas de la columna de dirección de LaMoto2 cumplen todos los requisitos de diseño establecidos en cuanto a resistencia mecánica, ya que ninguna de las piezas diseñadas soportan una tensión mayor de 250 MPa en

ninguno de los casos calculados.

En cuanto a la rigidez torsional, cuando el piloto introduce el máximo momento de giro alrededor de la dirección, la suma de todos los ángulos girados por los elementos es de:

$$\alpha_{Total} = \alpha_{horquilla\ direccion} + \alpha_{botellas\ telescópicas} = 0,119^{\circ} + 0.258^{\circ} = 0,377^{\circ}$$

Por tanto, también se cumple el criterio de deformación torsional, establecido en 0.5° . Es por ello, que todas las piezas diseñadas individualmente y la columna de dirección como conjunto han pasado el proceso completo de validación, y se considera que su diseño es definitivo.

9. Presupuesto

A continuación se expone un desglose de los costes de todas las actividades, equipos y horas de trabajo empleados en la realización de este proyecto. De esta manera, se ofrece un presupuesto que puede servir como indicador del coste total del proyecto.

Muchos de los conceptos en los que se ha invertido han tenido repercusión en el conjunto de toda la motocicleta. En los casos en los que el coste total es indivisible y no se pueden atribuir costes directos al sistema de dirección, se ha estimado un porcentaje de dedicación. Dicho porcentaje se ha utilizado para dar una idea del coste atribuible al apartado de la columna de dirección dentro de la motocicleta al completo.

De esta manera, la descripción del presupuesto se ha dividido en cuatro categorías principales ordenadas según las distintas fases de las que consta el proyecto:

- **Licencias de software:** Aquí se engloba el coste de las licencias de todos los programas informáticos usados durante la realización del presente documento: CATIA V5 y Working Model 2D.

Es necesario tener en cuenta que los programas también han sido usados para otras aplicaciones además del diseño de la columna de dirección. Actividades didácticas en el caso de la licencia educativa de WM de la universidad y el diseño del resto de la moto u otras actividades en el caso de la licencia de CATIA V5 del proyecto “LaMoto2”. Por tanto, ambos programas tienen un porcentaje de uso dedicado al sistema de dirección del 10%.

Además, en el caso del programa CATIA V5, solo se ha incluido el coste de los módulos utilizados, ya que se trata de un programa muy extenso, cuyos módulos se pueden alquilar o comprar por separado.

- **Trabajos de ingeniería:** En este apartado se realiza una estimación del tiempo empleado en las fases de diseño y análisis propiamente dichas del sistema de dirección. De esta forma se puede calcular aproximadamente el coste relacionado con los trabajos de ingeniería del proyecto.
- **Ensayos experimentales:** En esta categoría se engloban todos los costes relacionados con los ensayos experimentales realizados a lo largo del proyecto. Atribuyéndoles un porcentaje estimado de dedicación a la dirección, y repartiendo los costes remanentes sobre el resto de la moto.

Es necesario recordar en este punto, que los datos obtenidos mediante telemetría de una moto2, fueron cedidos de forma gratuita. Por lo que no han supuesto coste de compra, ni coste de realización alguno.

Los ensayos de extensometría si tuvieron un coste directo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que estos ensayos fueron realizados sobre distintos sistemas de la motocicleta y no solamente sobre la columna de dirección. Por ello los apartados cuyo coste no puede ser

dividido, llevan asociado un porcentaje de dedicación al sistema de dirección.

- Alquiler del circuito: 100€/día
 - Alquiler de los equipos: 300€/semana
 - Gasto de consumibles: 200€
 - Instalación equipo extensometría: 25€/hora
 - Trabajo en pista: 25€/h
 - Análisis de datos: 75€/h
 - Porcentaje del coste total recaído sobre la dirección: 30%
- **Redacción de la memoria**: En este apartado se desarrollan los costes relacionados con la propia redacción de la memoria.

Una vez conocidas todas las necesidades de inversión, se presenta un presupuesto detallado con el coste total de cada uno de los apartados así como el presupuesto global del trabajo de fin de grado completo.

PRESUPUESTO COMPLETO

Licencias de Software:

Tabla 9.1: Presupuesto licencias de software

Razón	Coste unitario	Unidades	Porcentaje de dedicación	Coste imputable
Working Model	6000 €/año	1 año	10 %	600 €
CATIA V5	14000 €/año	1 año	10 %	1400 €

Trabajo de ingeniería:

Tabla 9.2: Presupuesto trabajo de ingeniería

Razón	Coste unitario	Unidades	Porcentaje de dedicación	Coste imputable
Planificación del proyecto	75 €/h	10 horas	-	750 €
Diseño componentes	75 €/h	100 horas	-	7500 €
Análisis y simulaciones	75 €/h	40 horas	-	3000 €

Ensayos extensometría:

Tabla 9.3: Presupuesto ensayos extensometría

Razón	Coste unitario	Unidades	Porcentaje de dedicación	Coste imputable
Alquiler circuito	100 €/día	1 día	30 %	30 €
Alquiler equipo	300 €/semana	1 semana	30 %	90 €
Gastos consumibles	200 €	-	30%	60 €
Alquiler motocicleta	500€/día	1 día	30 %	150 €
Instalación galgas	25 €/hora	4 horas	-	100 €
Trabajo en pista	25 €/hora	10 horas	30 %	75 €
Análisis de datos	75 €/hora	4 horas	-	300 €

Realización de la memoria:

Tabla 9.4: Presupuesto realización de la memoria

Razón	Coste unitario	Unidades	Porcentaje de dedicación	Coste imputable
Documentación	25 €/h	20 horas	-	500 €
Redacción	25 €/h	80 horas	-	2000 €

De esta manera, los costes totales ascienden a:

Coste del TFG: 16555 €

10. Conclusiones y trabajos futuros

10.1. CONCLUSIONES

Llegados al final del presente Trabajo de Fin de Grado, se puede afirmar que los objetivos principales del mismo, “Diseñar una columna de dirección adaptada al sistema de suspensión alternativa de la motocicleta “LaMoto2” y lograr que el modelo diseñado transmita la mayor cantidad de información posible al piloto”, se han cumplido satisfactoriamente.

En este documento se ha explicado detalladamente todo el proceso de diseño de la columna de dirección que se ha realizado para la motocicleta del proyecto LaMoto2. Tras todo lo expuesto a lo largo de la memoria, se puede concluir que han alcanzado todos los objetivos propuestos al inicio de este trabajo y que se detallan a continuación:

- Se ha realizado un detallado estudio de la física de las motocicletas y del estado del arte de los sistemas de suspensión y dirección. A partir de este estudio, se han establecido las características técnicas que el sistema de dirección de LaMoto2 debía cumplir.
- Se ha establecido una metodología de diseño original para el proceso de diseño de la columna de dirección. Estas pautas se han usado para orientar las distintas decisiones tomadas y han servido para alcanzar de forma satisfactoria las especificaciones que debía cumplir el sistema de dirección planteado.
- Se han detallado los sistemas de telemetría y extensometría adecuados para analizar una motocicleta de competición en condiciones reales de funcionamiento. Usando los resultados de este análisis se han establecido los criterios de resistencia mecánica y de comportamiento dinámico que el sistema de dirección de la motocicleta debía cumplir.

También, se ha realizado un estudio de la normativa de las competiciones “CEV Buckler” y “MotoStudent”, lo que ha permitido realizar un diseño de la columna de dirección adaptado a las mismas, por lo que podrá ser incorporada a la moto que participe en los campeonatos en curso.

- Se ha propuesto un proceso de fabricación basado en herramientas estándar. De esta manera, se simplificarán al máximo todas las operaciones, minimizando las posibles fuentes de errores en el proceso de fabricación.

La estandarización del proceso de fabricación diseñado ofrecería la posibilidad de incluir futuros proveedores en dicho proceso de fabricación sin que la falta de experiencia previa con ellos pueda suponer ninguna merma en la calidad de las piezas fabricadas.

- Mediante el uso del software CATIA V5 y Solid Works se ha alcanzado un diseño de

columna de dirección adecuado a las características de la suspensión delantera de LaMoto2.

Asimismo, se ha comprobado que todas y cada una de las piezas de la columna de dirección cumplen con los criterios geométricos y mecánicos establecidos, verificando que, bajo las condiciones de funcionamiento dadas en una competición de motociclismo, estas piezas siempre se mantienen dentro de unos coeficientes de seguridad superiores a los establecidos.

Finalmente, se puede afirmar que el sistema de dirección para la suspensión delantera de LaMoto2 planteado es plenamente capaz de desempeñar sus funciones de forma completamente satisfactoria y, por ello, se considera totalmente viable su fabricación y montaje para efectuar las pruebas experimentales y poder participar en la competición CEV Buckler.

10.2. TRABAJOS FUTUROS

En este punto, considerando que el sistema diseñado cumple satisfactoriamente los objetivos iniciales y los criterios impuestos, se da por concluido el proceso de diseño. Sin embargo aún existen varias vías sin explorar que se plantean como trabajos futuros.

Debido a la necesidad de adaptar la motocicleta a las características de cada uno de los circuitos del calendario del campeonato, queda como primera vía de desarrollo el diseño de un sistema de configuración del set-up de la motocicleta.

Por otro lado, se perfila la posibilidad de realizar un modelo matemático en 3D de la motocicleta completa, mediante el que se pueda estudiar el comportamiento de la suspensión y dirección en conjunto con el resto de la motocicleta y, sobretodo, durante el proceso de entrada y salida de la curva.

También queda abierta la realización de un análisis estructural de la columna de dirección al completo en el que se pueda estudiar con más detalle las interacciones entre elementos. Con el objetivo de mejorar y optimizar cada una de las piezas que componen el sistema.

Una vez comenzado el proceso de fabricación, será necesario realimentar el proceso de diseño en función de las posibles eventualidades, o de cara a un posible abaratamiento de costes aconsejado por la experiencia de los proveedores. Todos estos imprevistos no pueden ser conocidos hasta que no tenga lugar el proceso de fabricación propiamente dicho. En ese momento, habrá que realizar una reinterpretación orientada al proceso de fabricación del esquema presentado en la figura 5.3.

Una vez construido un prototipo real de la motocicleta, surgen infinidad de posibles vías de experimentación usando el prototipo real.

La más obvia tiene que ver con la rigidez del sistema. Sin haber fabricado la motocicleta, aún resulta una incógnita si se ha logrado cumplir el objetivo de lograr un buen “feeling” por parte del piloto. Esto es debido a que las sensaciones percibidas no pueden ser mediadas y cuantificadas por

ningún modelo matemático, por lo que el éxito en este aspecto no podrá ser corroborado hasta que no se construya un modelo definitivo y sea probado.

Sin embargo, una vez el prototipo esté operativo, puede realizarse un experimento muy interesante de cara a la comprensión de las necesidades de rigidez. En este análisis se compararían los resultados de pruebas de extensometría realizados sobre la motocicleta con las sensaciones del piloto usando distintas piezas. Si se diseñan piezas de distintas rigideces y se prueban en la motocicleta, se pueden comparar las sensaciones del piloto con los resultados de pruebas de extensometría realizadas simultáneamente. Cruzando estas dos fuentes de datos, puede realizarse un análisis que arroje más luz sobre la relación entre rigidez del sistema de suspensión y sensaciones del piloto.

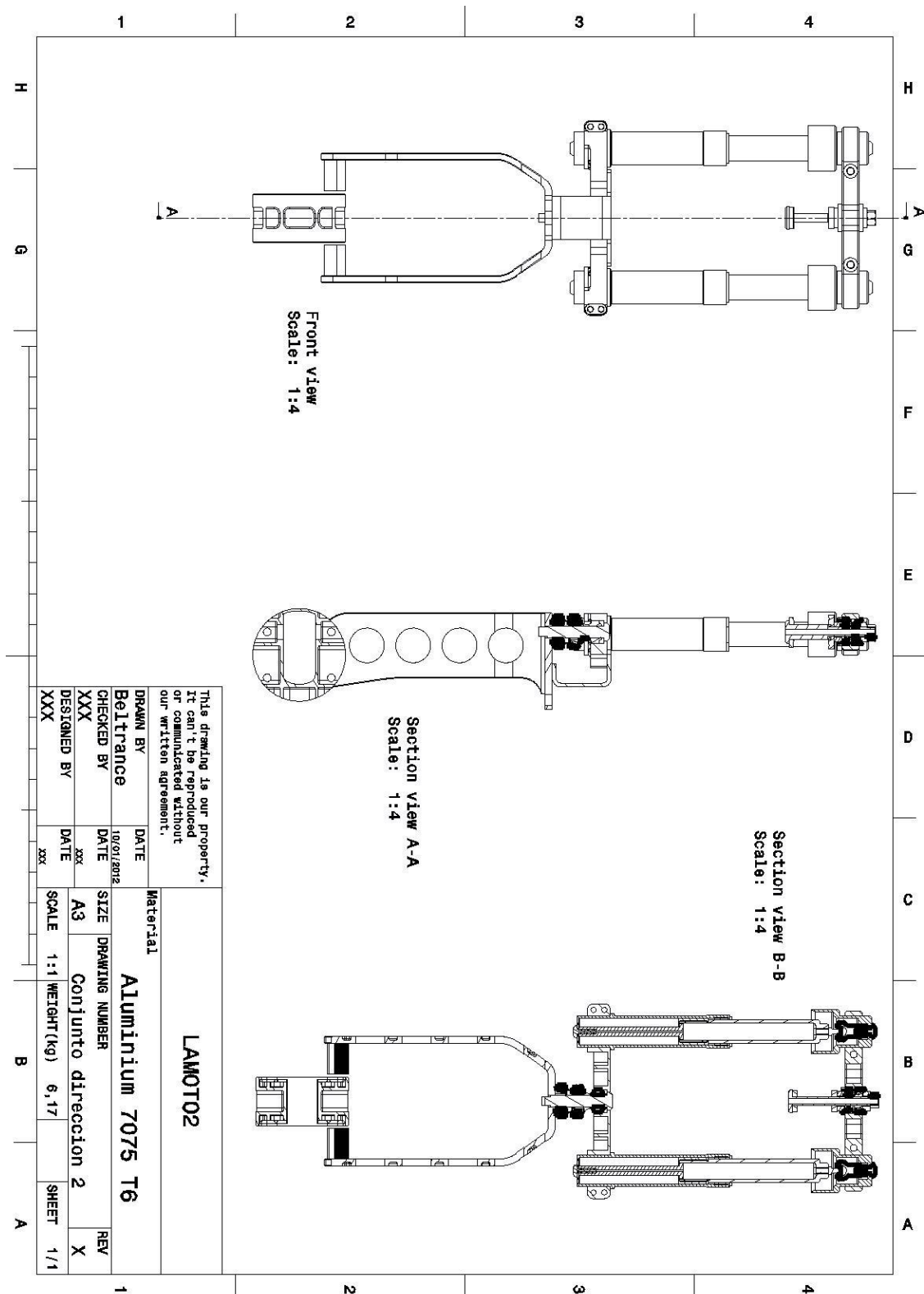
Bibliografía

- [1] ARIAS-PAZ Guitian, Manuel. *Motocicletas*. 33a ed. Madrid: Dossat, 2003. 751 p. ISBN: 84-96437-26-4
- [2] BRADLEY, John. *The Racing Motorcycle: a technical guide for constructor, Vol. 1*. 1a ed. Broadland Leisure Publications, 1996. 408 p. ISBN 0-9512929-2-7
- [3] BRADLEY, John. *The Racing Motorcycle: a technical guide for constructors, Vol. 2*. 1a ed. Broadland Leisure Publications, 2003. 464 p. ISBN 0-9512929-3-5
- [4] COSSALTER, Vittore. *Motorcycle dynamics*. 2a ed. Milton Keynes: Lightning Source, 2006. 360 p. ISBN: 9781430308614
- [5] FOALE, Tony. *MOTOCICLETAS: Comportamiento dinámico y diseño de chasis*. Sánchez, David (trad.). 1a ed. Tony Foale Designs, 2003. 482 p. ISBN: 84-933286-0-X
- [6] VÁSQUEZ ANGULO, José Antonio. *Análisis y diseño de piezas con CATIA V5*. 1a ed. Barcelona: Marcombo, 2009. 270 p. ISBN: 978-84-267-1524-1
- [7] CATIA V5 Solutions, Version 5 Release 17, English online documentation, Dassault Systèmes, París, 2006.
- [8] MAGNITUDE Engineering Solutions. *CATIA V5 Video tutorial*. [Material audiovisual]. 1a ed. 135 grabaciones.
- [9] RFME: Real Federación Motociclista Española. *CEV Buckler 2012: reglamento técnico moto2* [en línea]. [Consultado el 3 de Septiembre de 2012]. <http://www.cevbuckler.com/es/reglamento?anyo=2012&what=reglamentos_tecnicos&categoria=19>
- [10] FIM: Fédération Internationale de Motocyclisme. *FIM road racing world championship grand prix regulations 2012* [en línea]. [Consultado el 3 de Septiembre de 2012]. <http://www.fim-live.com/fileadmin/alfresco/GP_en.pdf>
- [11] Moto Engineering Foundation: *Normativa tecnica MotoStudent. Año 2011-2012*. [En línea]. [Consultado el 3 de Septiembre de 2012]. <http://www.motostudent.com/documentacion/Reglamento_Tecnico_v11-02.pdf>
- [12] SKF Española. Catálogo [en línea]. [Consultado el 3 de septiembre de 2012] <http://www.skf.com/portal/skf_es/home>

Anexo 1: Planos del sistema

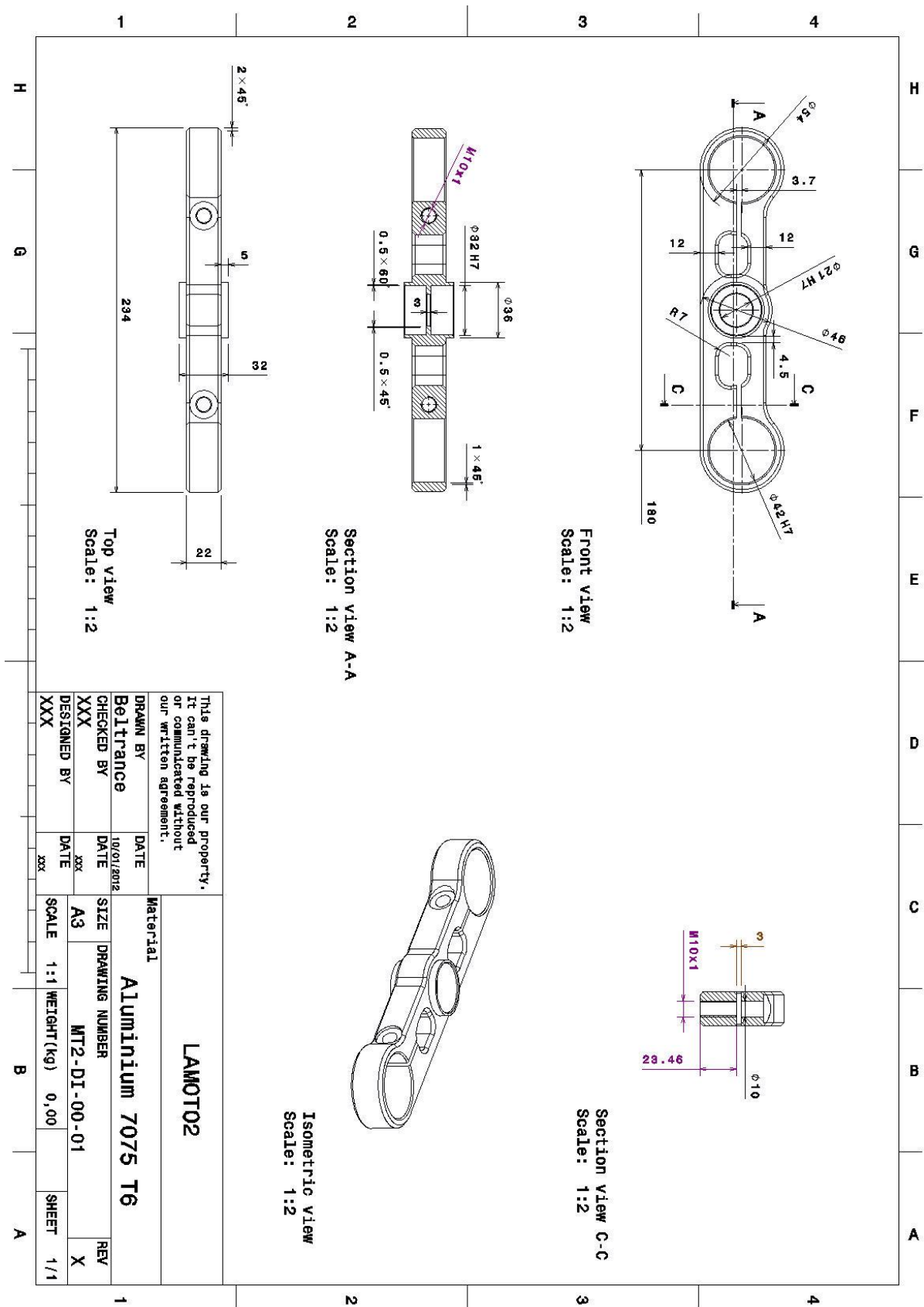


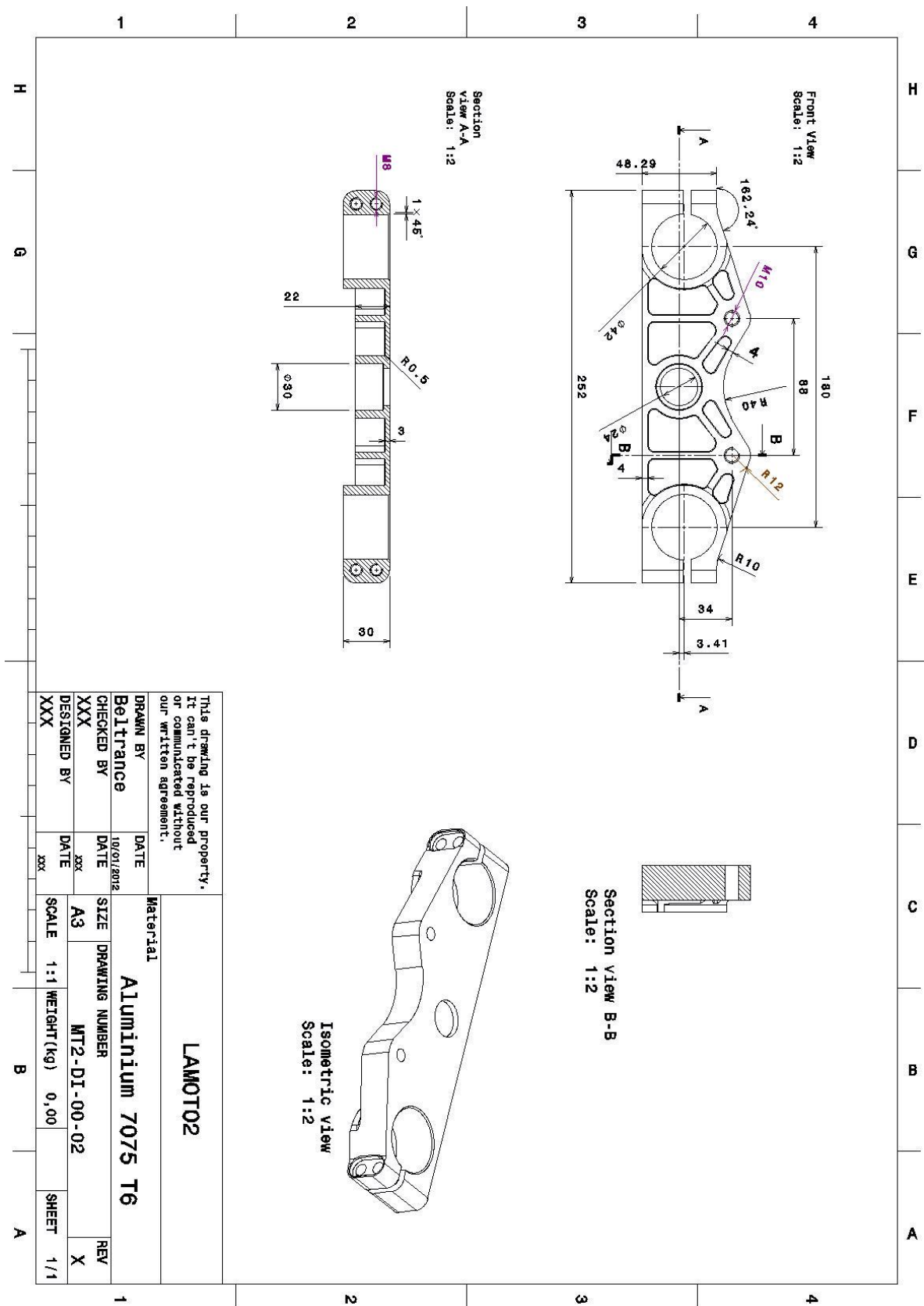
COLUMNA DE DIRECCIÓN AL COMPLETO



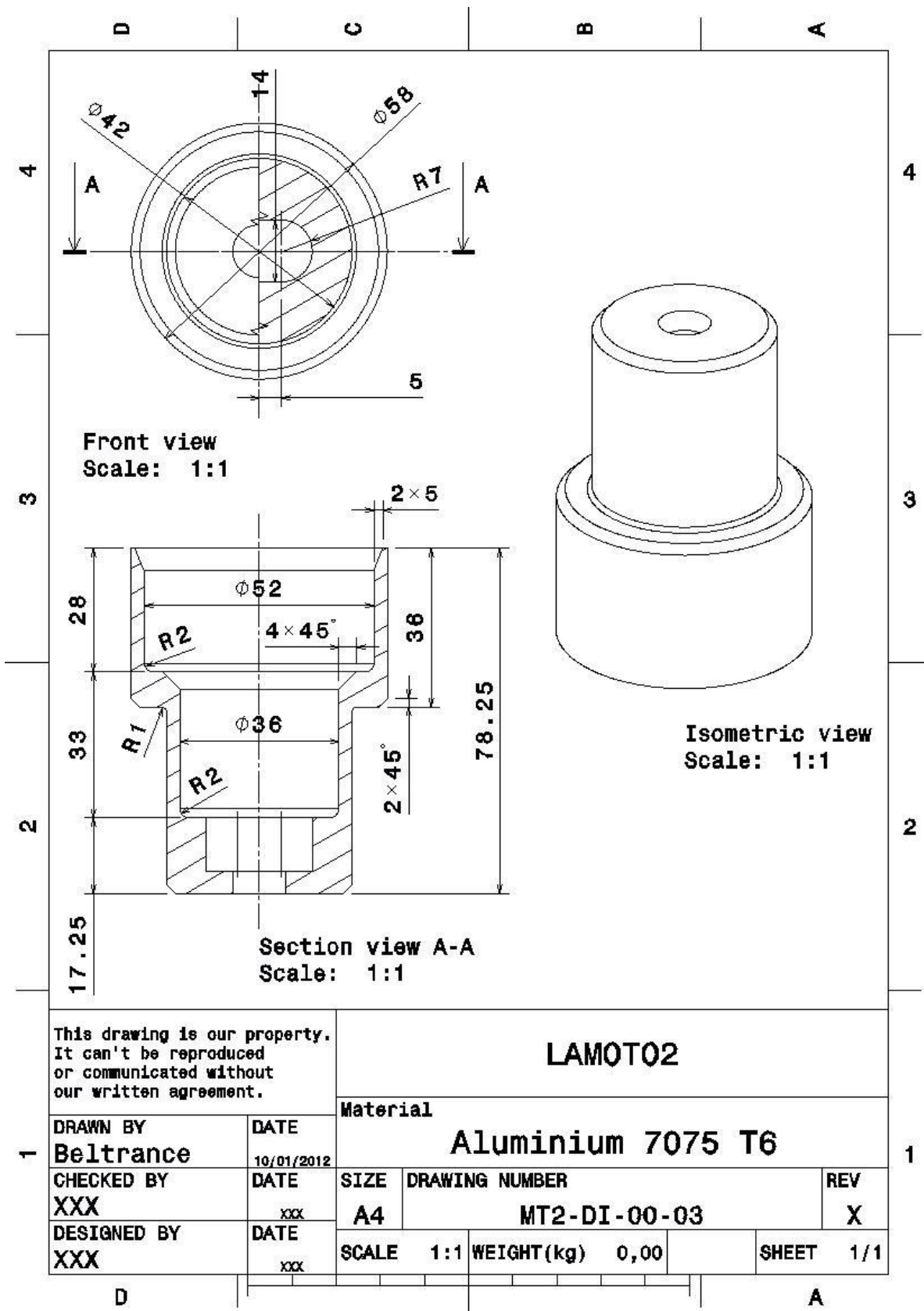
CONJUNTO BOTELLAS TELESCÓPICAS (MT2-DI-00-00)

MT2-DI-00-01

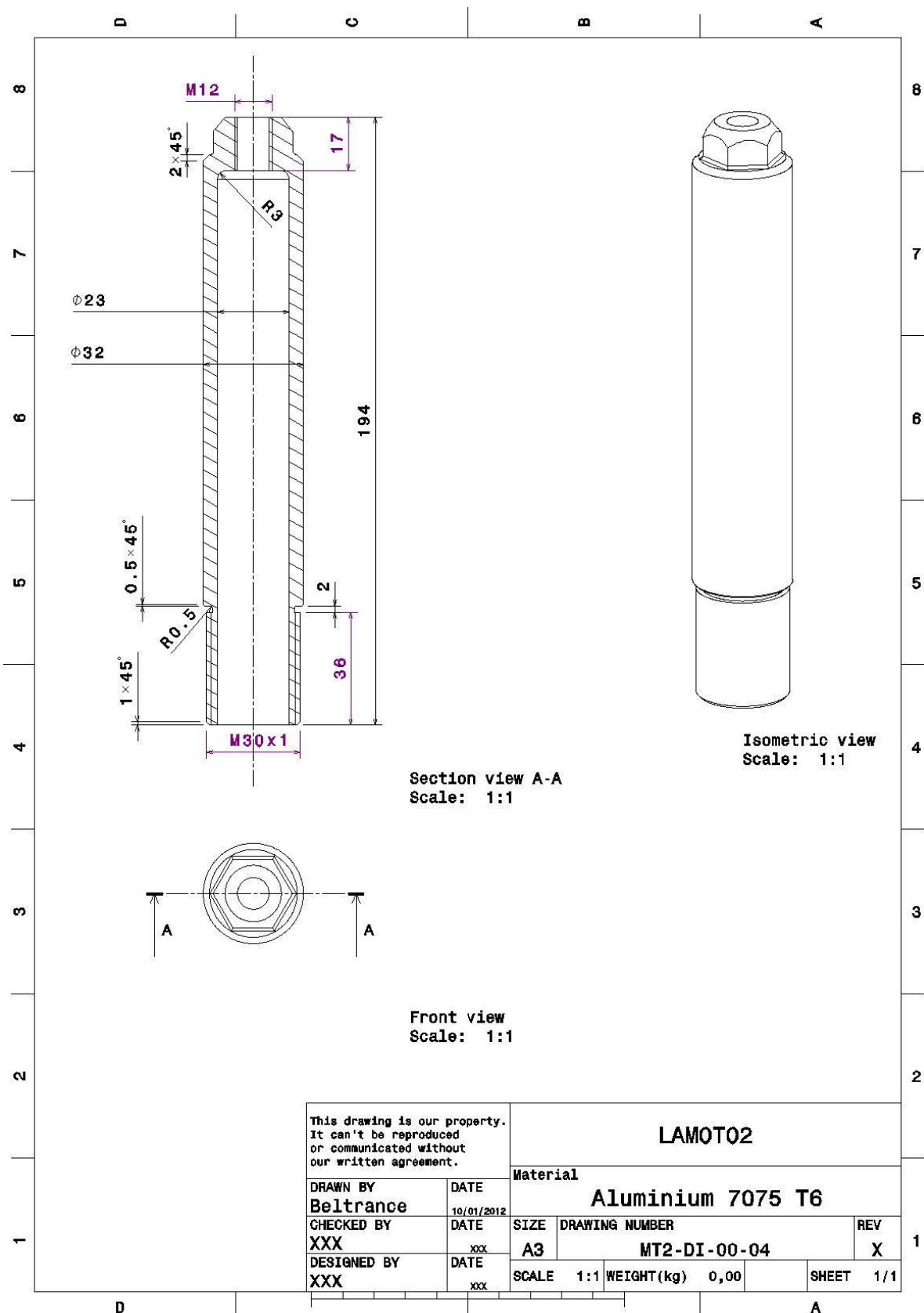




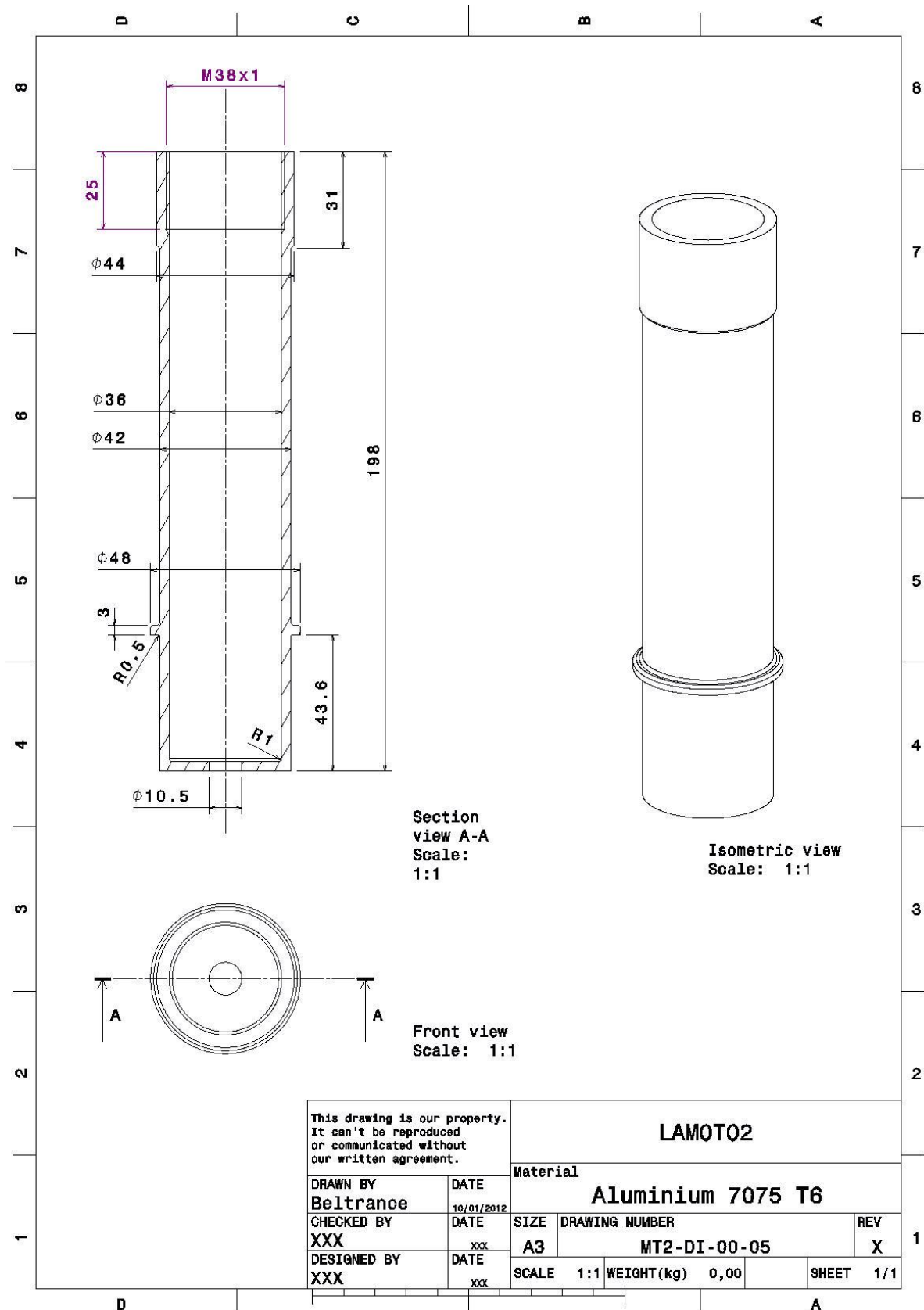
MT2-DI-00-03



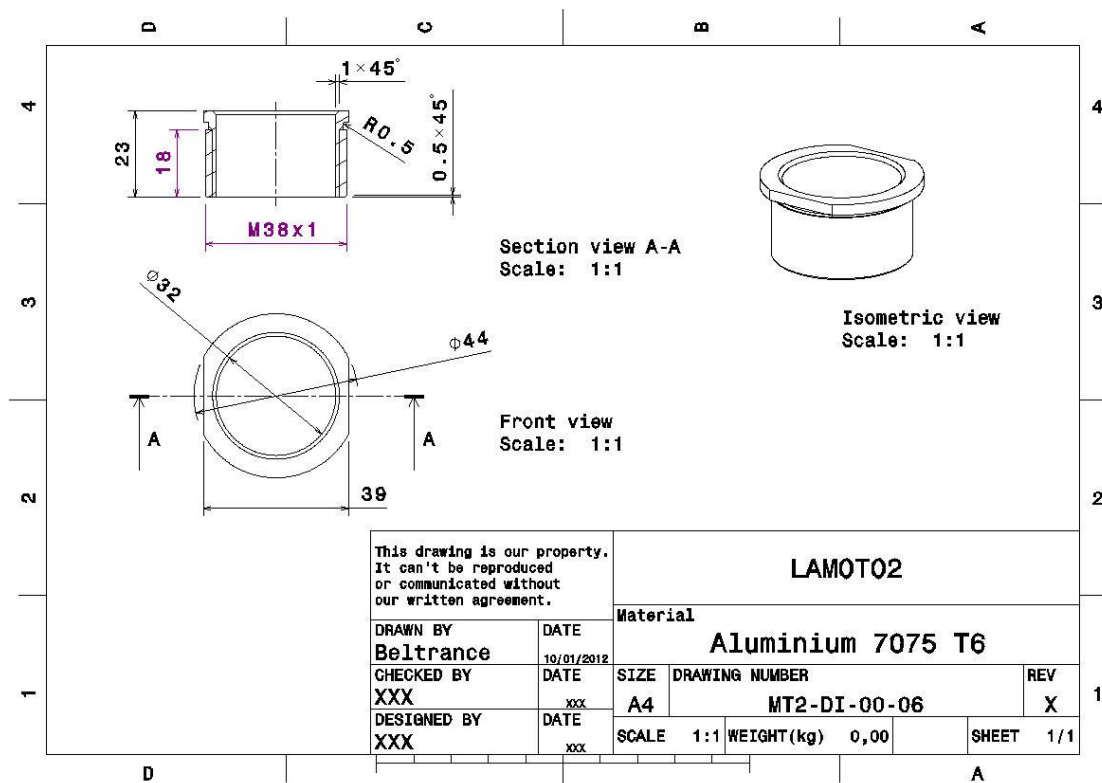
MT2-DI-00-04



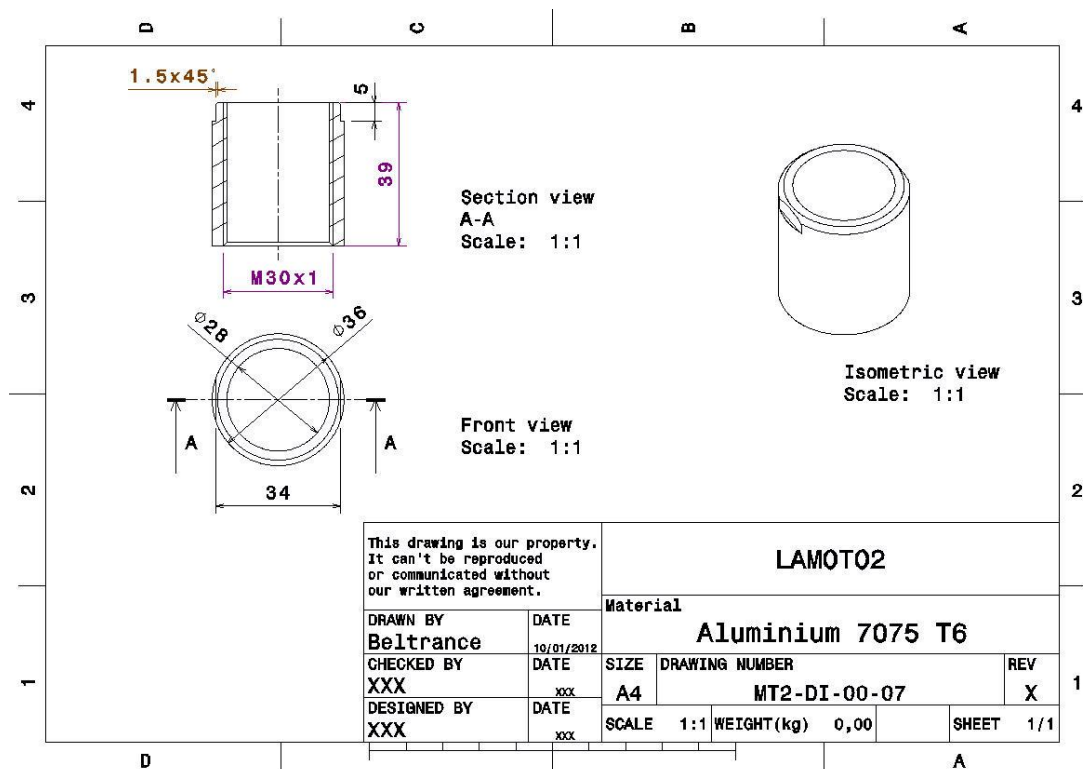
MT2-DI-00-05



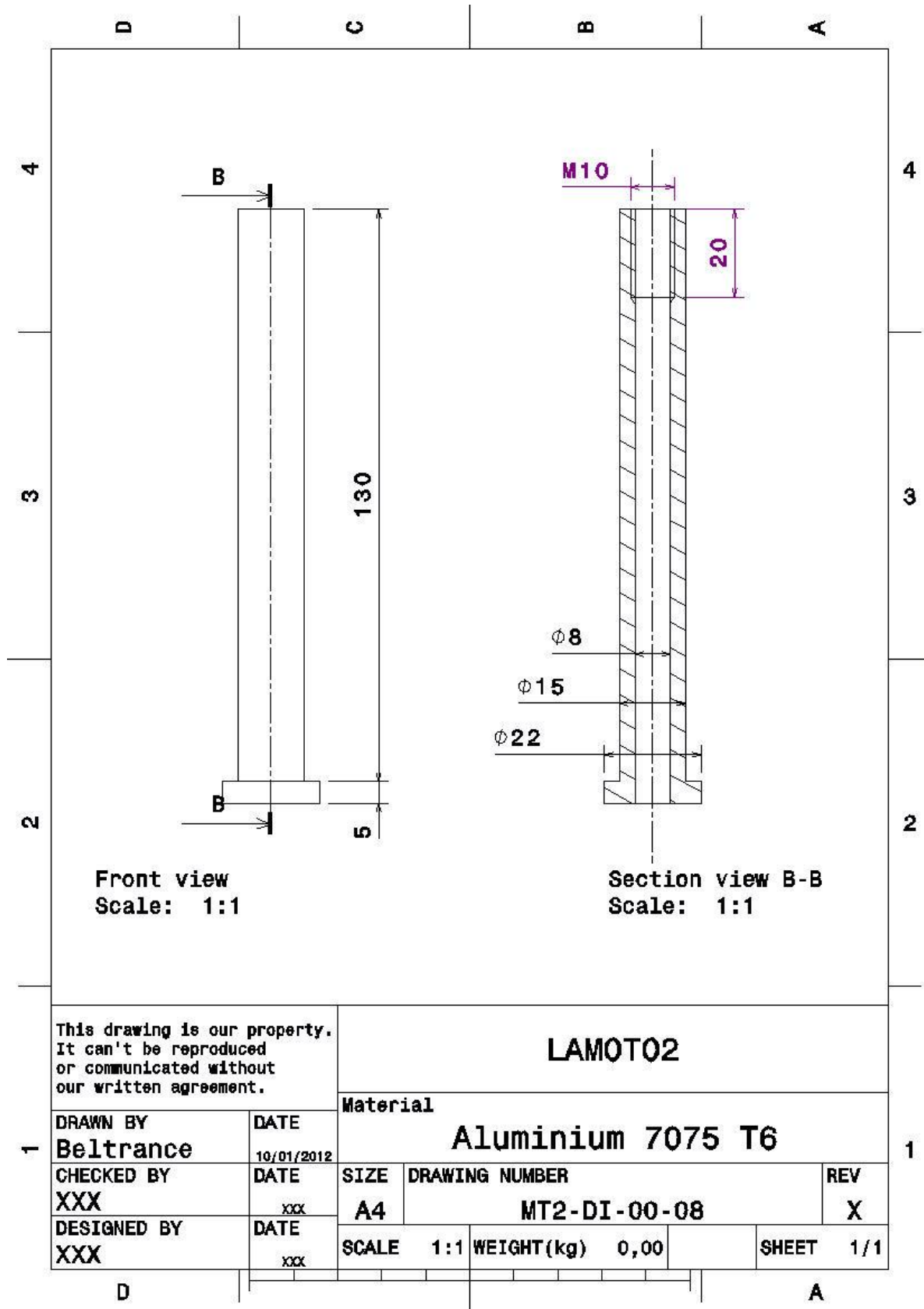
MT2-DI-00-06



MT2-DI-00-07

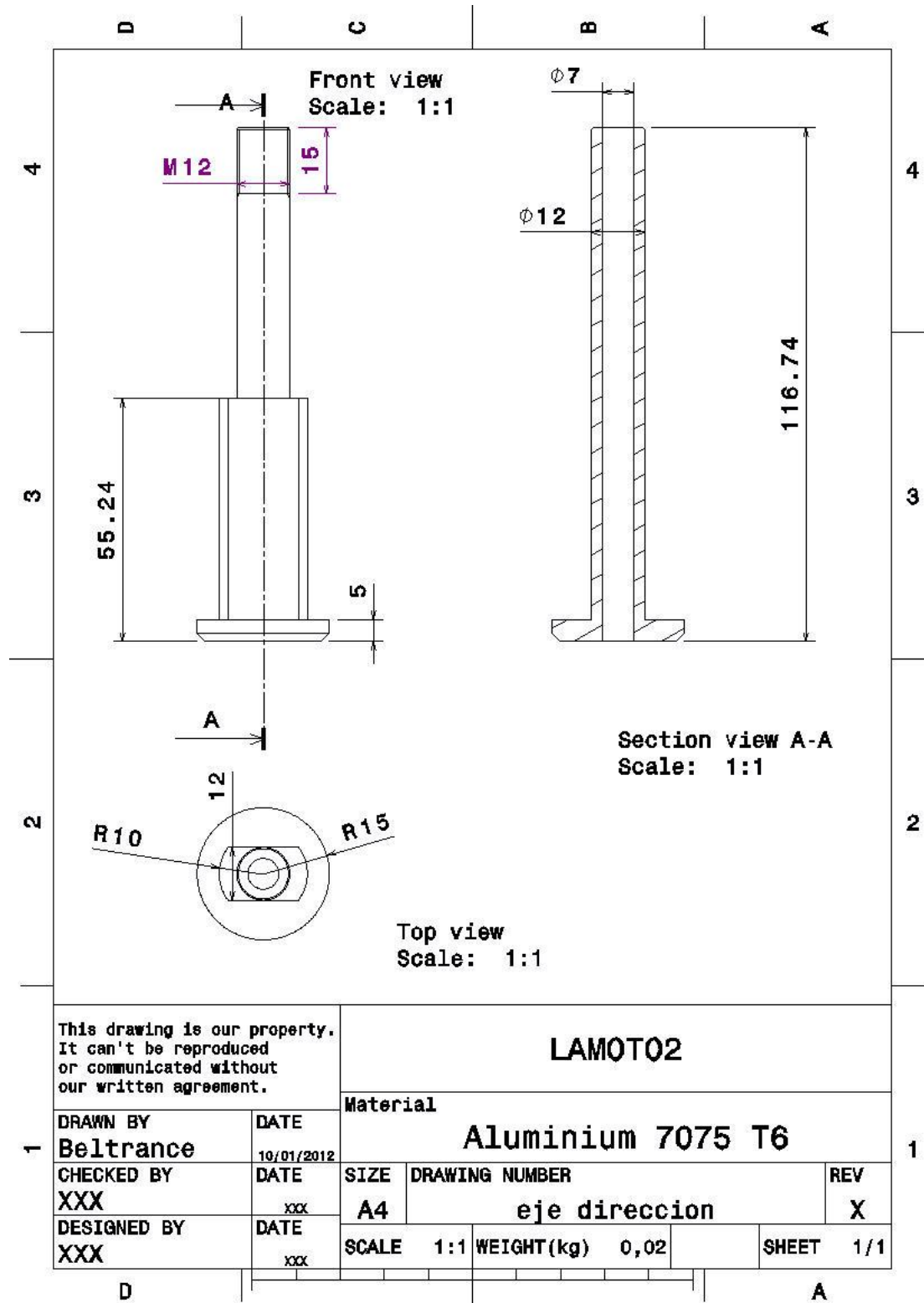


MT2-DI-00-08

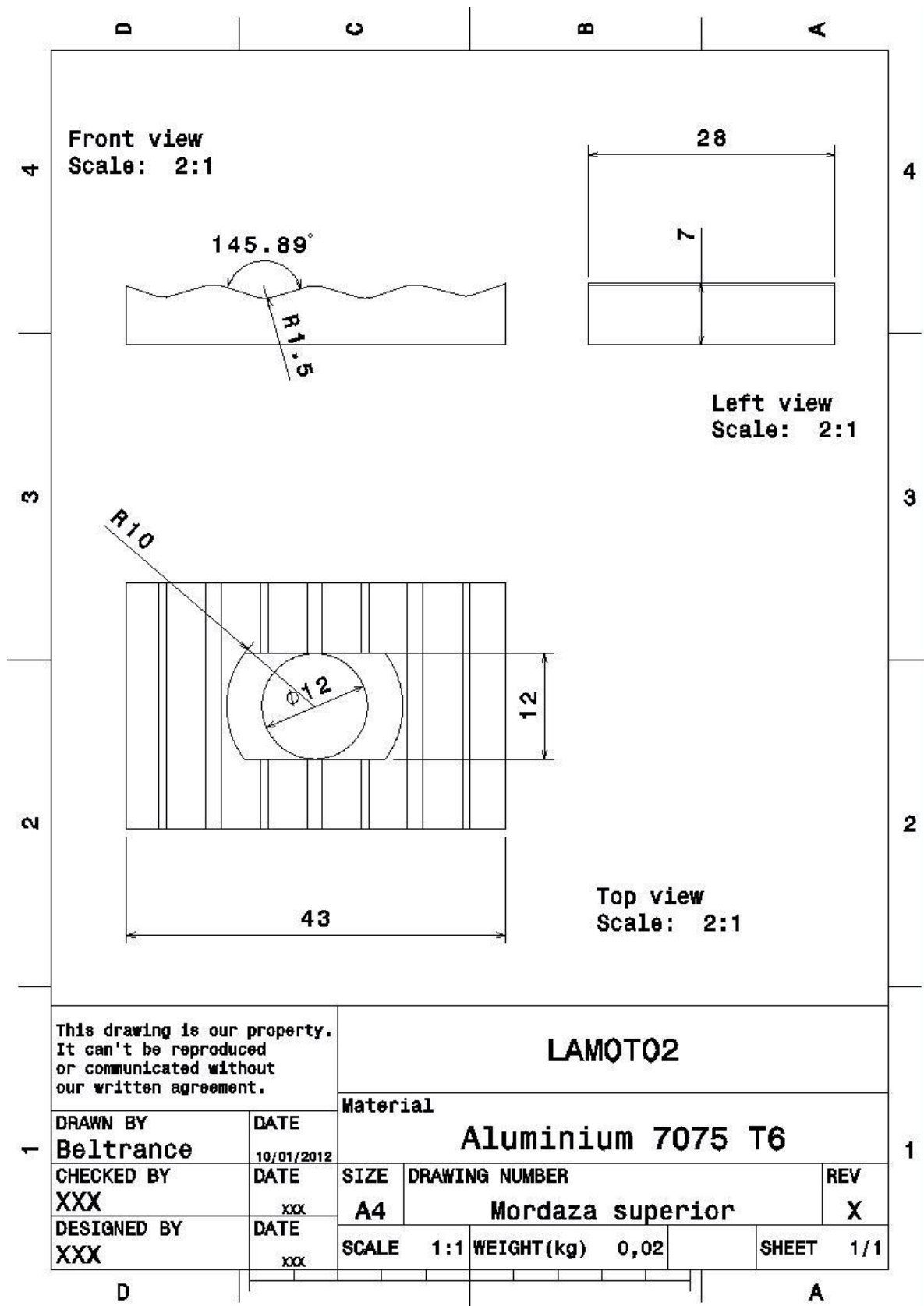


CONJUNTO PIPA DIRECCIÓN (MT2-DI-01-00)

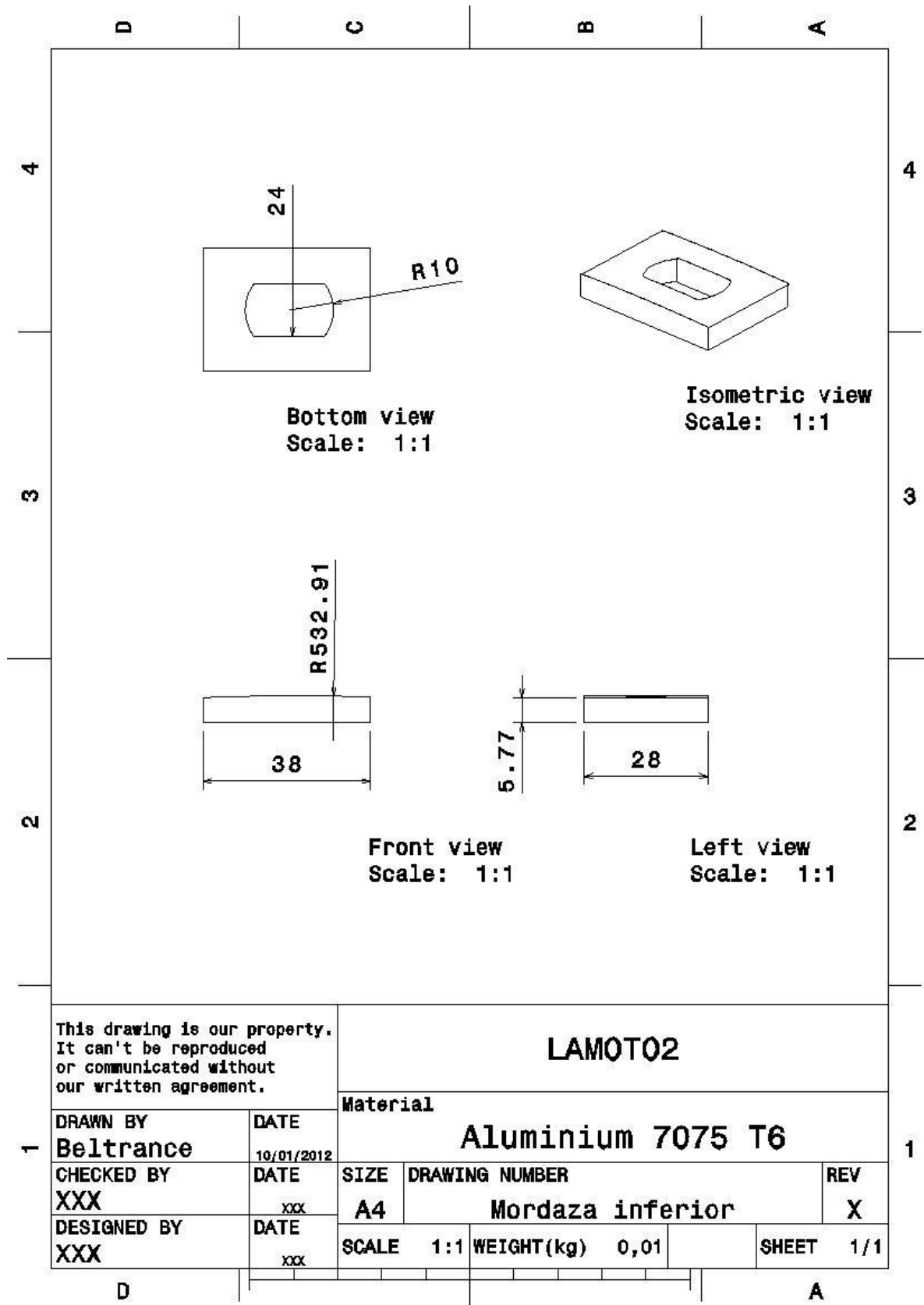
MT2-DI-01-01



MT2-DI-01-02

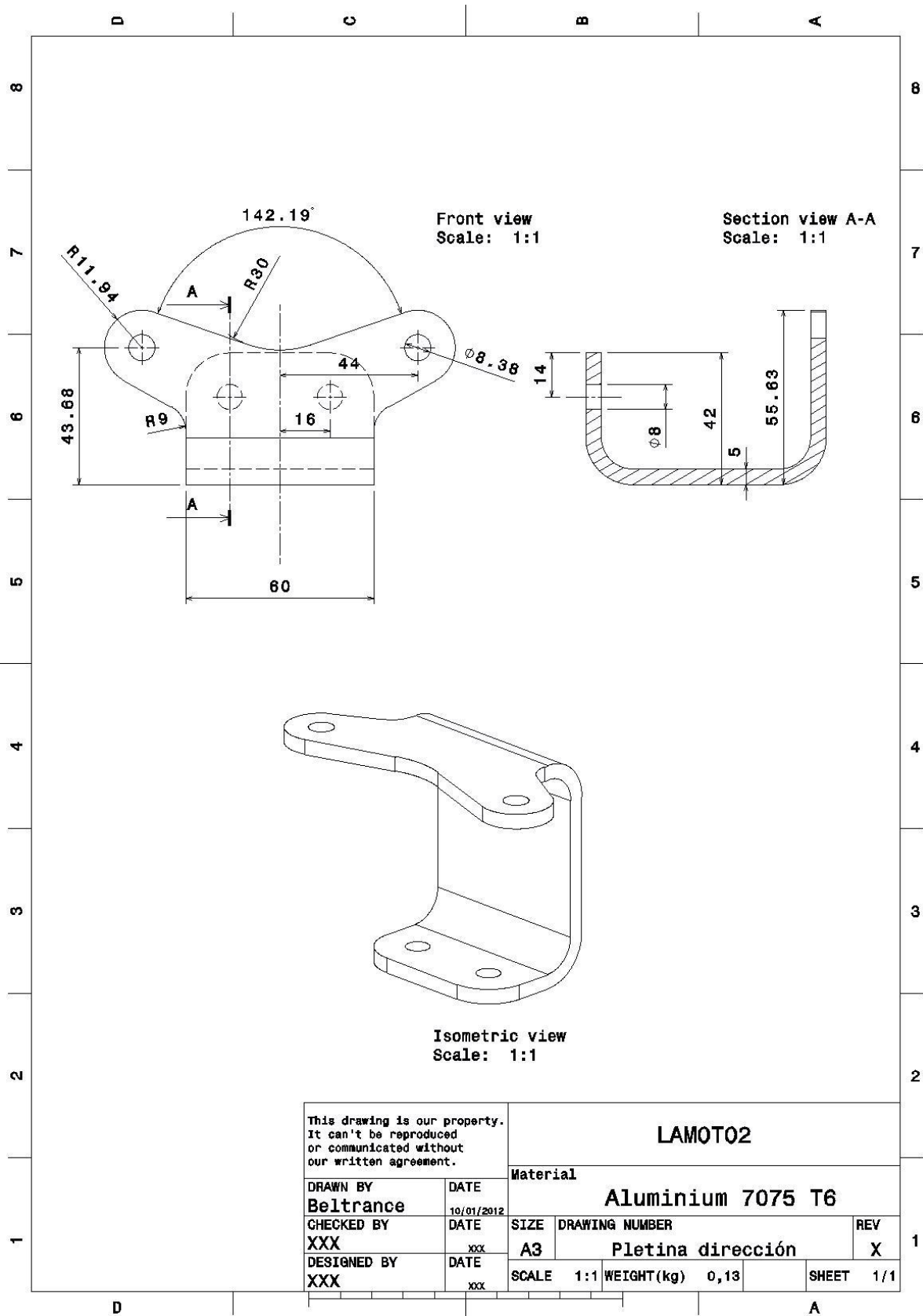


MT2-DI-01-03



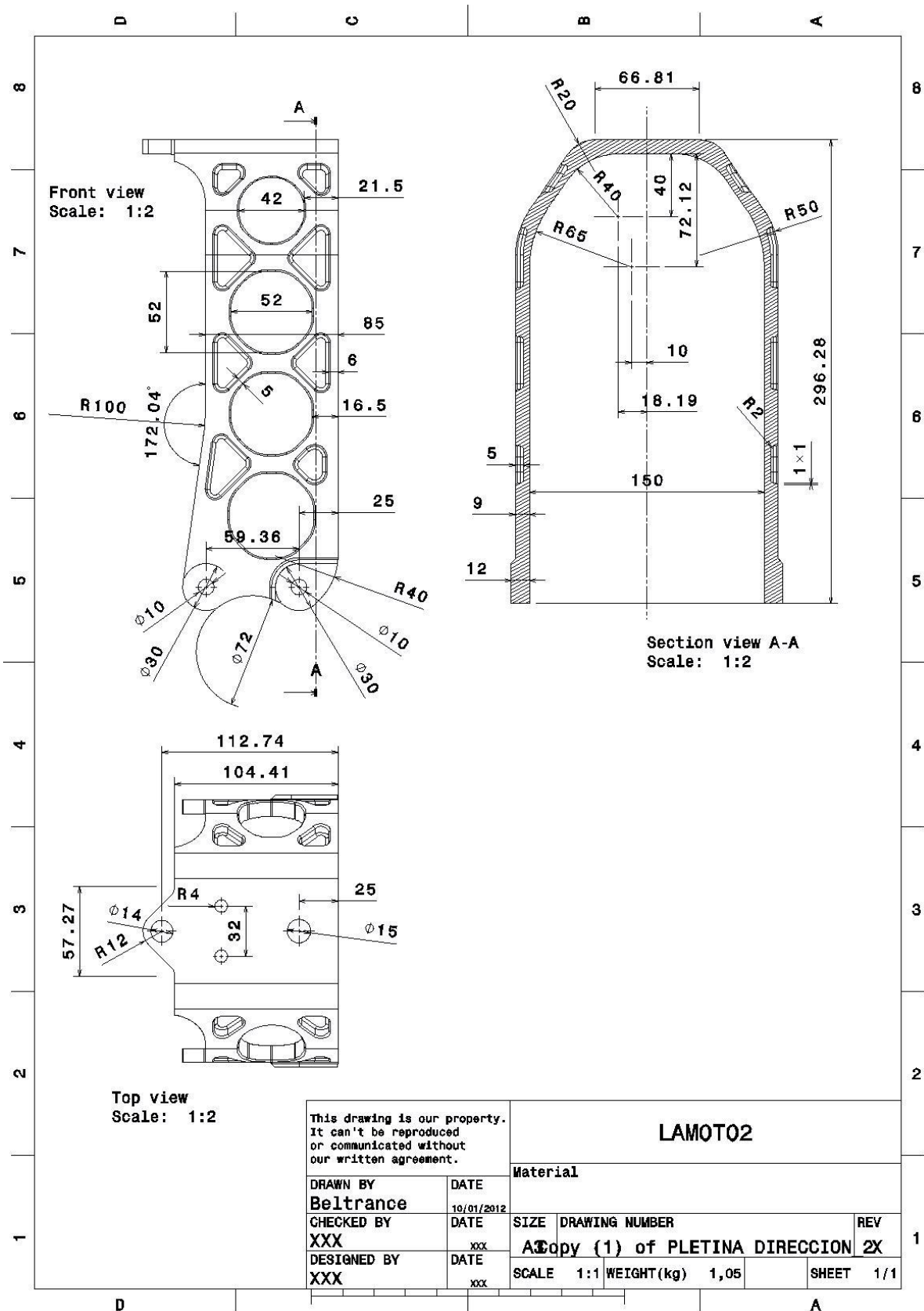
CONJUNTO PLETINA DIRECCIÓN (MT2-DI-02-00)

MT2-DI-02-01

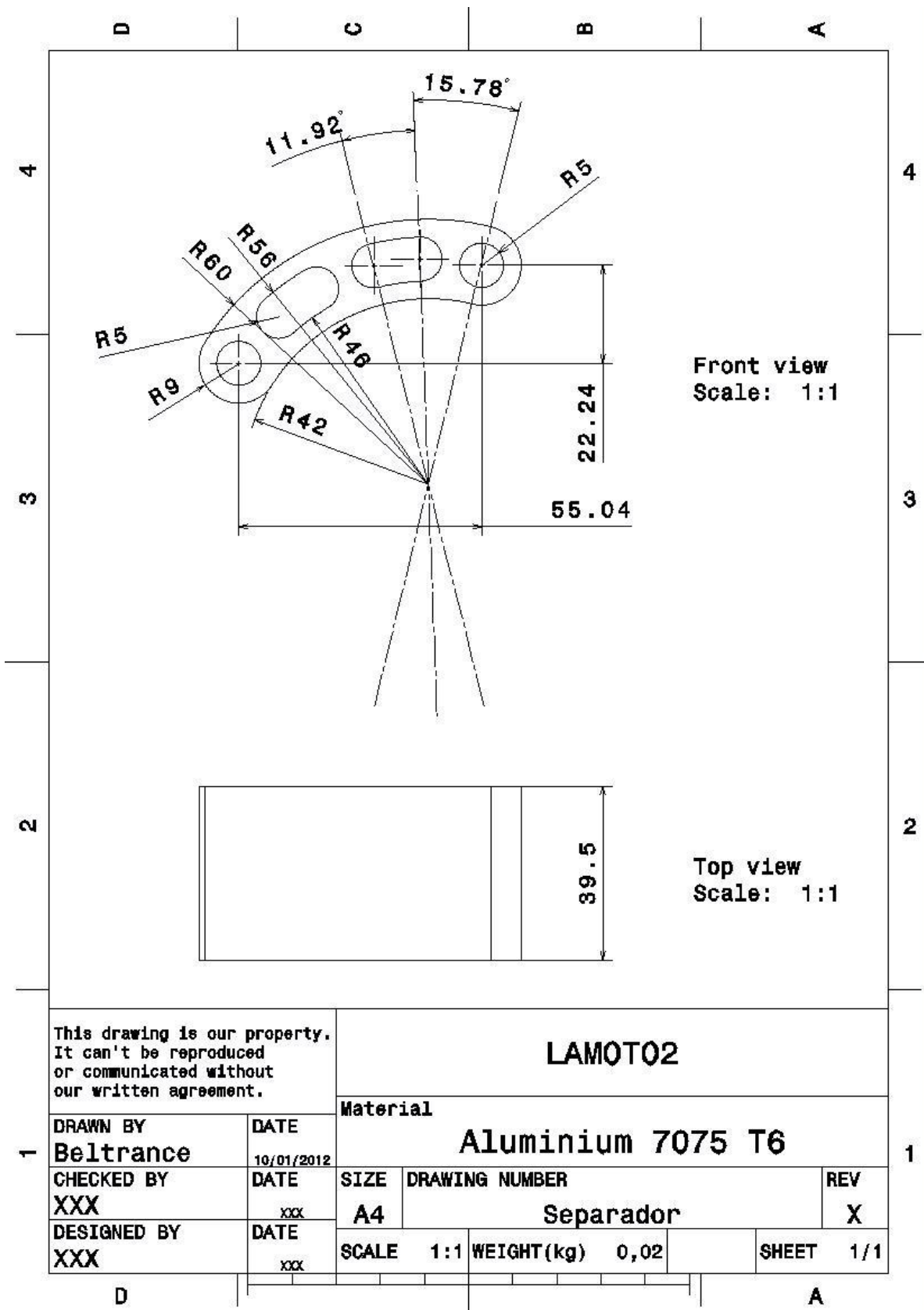


CONJUNTO HORQUILLA DIRECCIÓN (MT2-DI-03-00)

MT2-DI-03-01

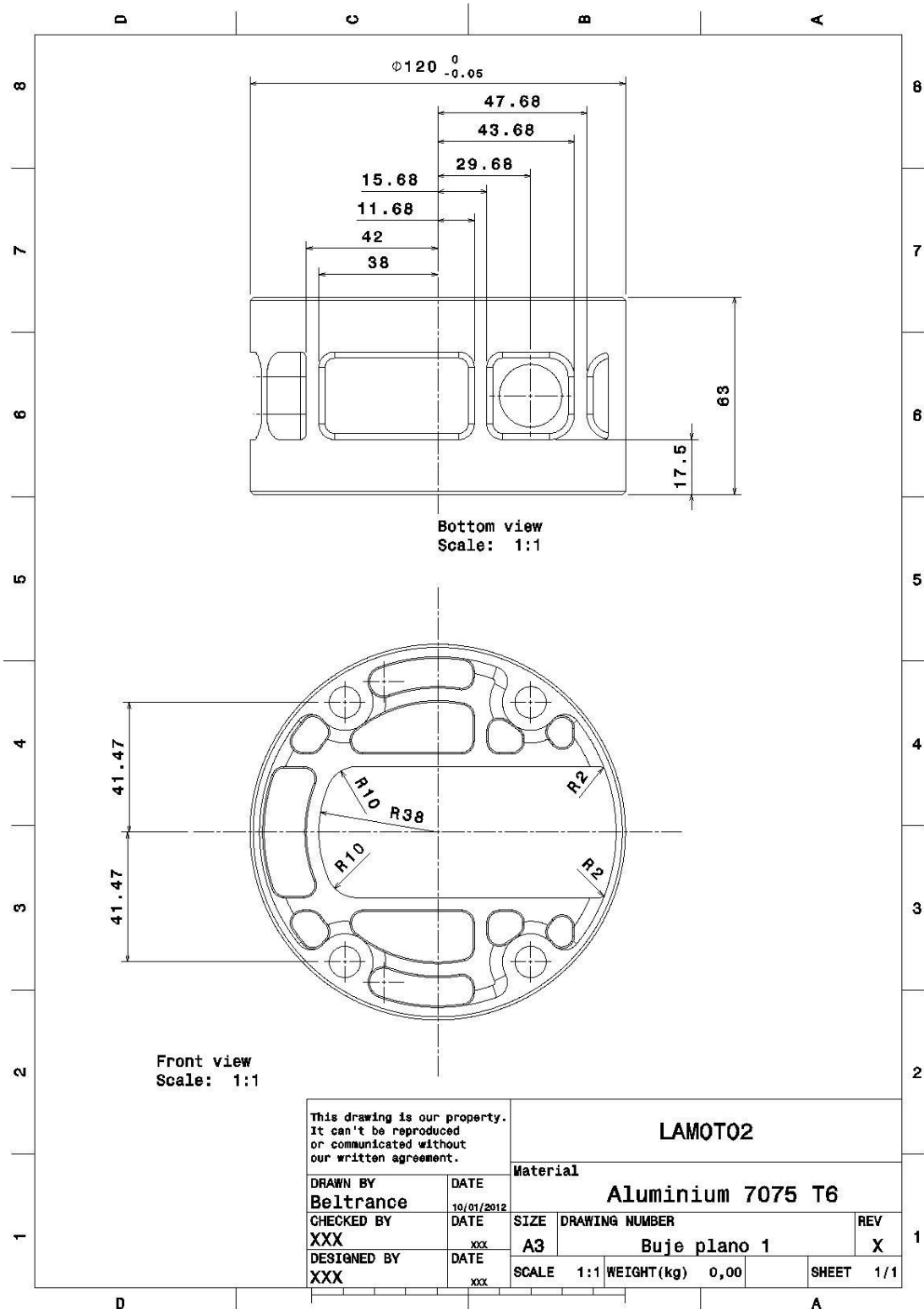


MT2-DI-03-02



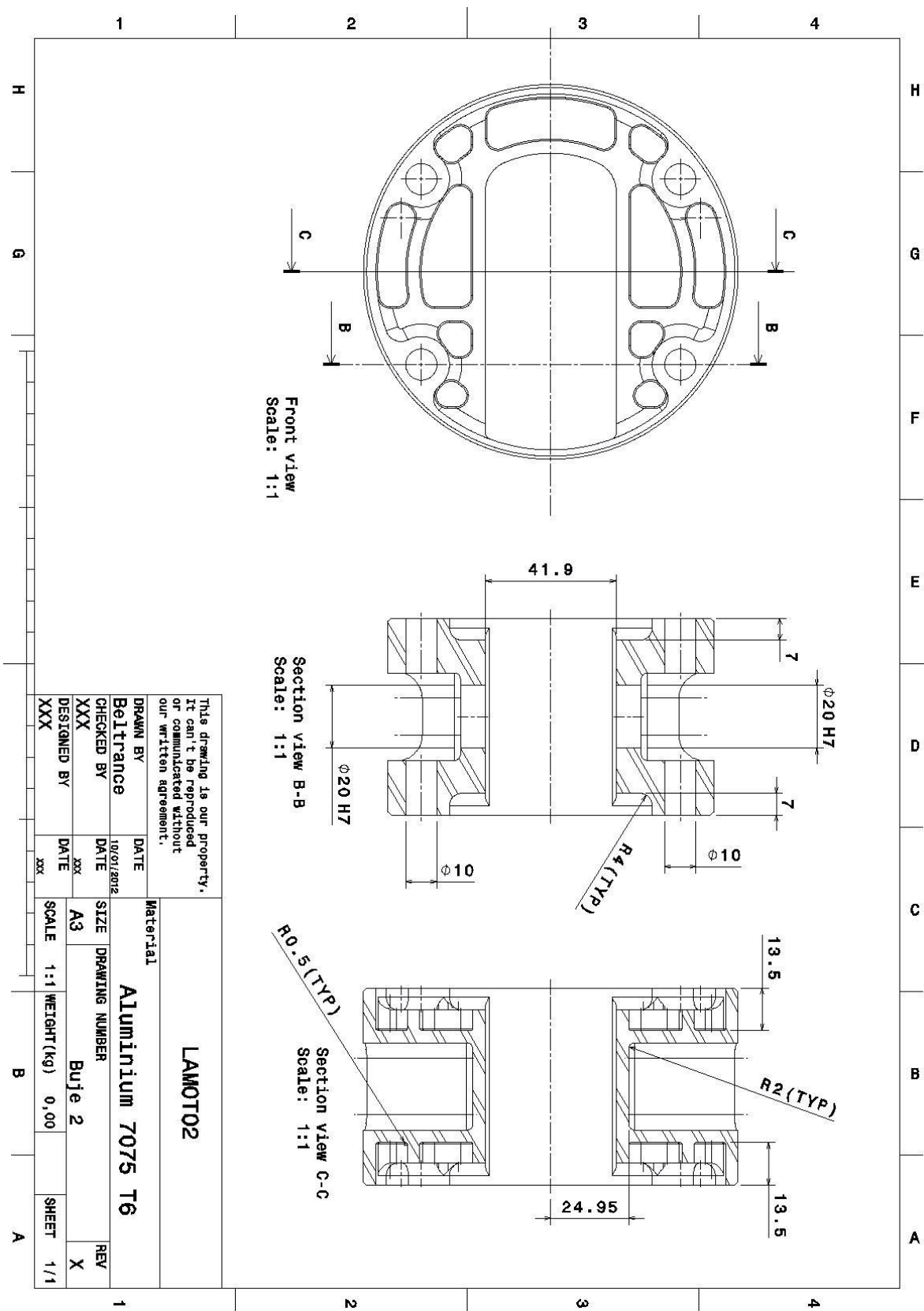
CONJUNTO BUJE (MT2-DI-04-00)³

MTS-DI-04-01 (plano 1)

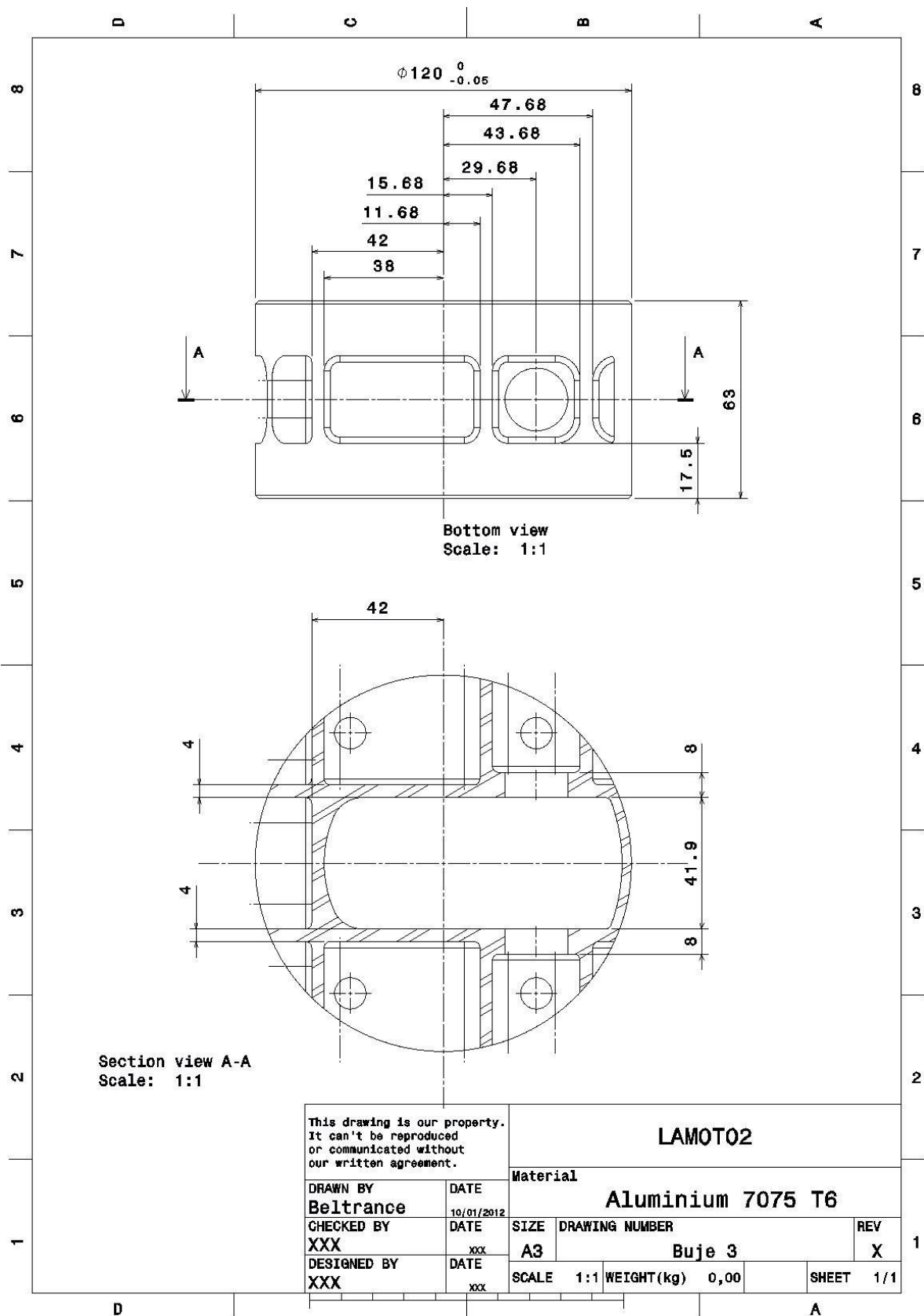


³ *Debido al gran tamaño del plano original, éste se ha dividido en tres planos individuales para poder ser presentado de manera legible.

MTS-DI-04-01 (plano 2)



MTS-DI-04-01 (plano 3)



Anexo 2: Reglamento CEV Buckler



REGLAMENTO TÉCNICO Moto2 CEV 2012

Índice

1. Motor
2. Sistema de admisión de carburante
3. El depósito de combustible y manguitos
4. Airbox
5. Gasolina y lubricantes
6. Sistema de Escape
7. Sistema de Refrigeración
8. Embrague y Transmisión
9. Encendido y electrónica
10. Toma de datos
11. Diseño de Chasis, Construcción y carenado
12. Peso
13. Frenos
14. Suspensión
15. Llantas
16. Neumáticos
17. Materiales y Construcción
18. General
19. Otras normas
20. Números y Fondos



REGLAMENTO TÉCNICO Moto2 CEV 2012

Reglamento Técnico

Fabricante del motor la motocicleta: Honda Motor Co., Ltd.
Modelo: CBR600RR07 - CBR600RR08 - CBR600RR09 - CBR600RR10
CBR600RR11 - CBR600RR12

TODO AQUELLO QUE NO ESTÁ AUTORIZADO Y PRECISADO EN ESTE REGLAMENTO **ESTA TOTALMENTE PROHIBIDO**

1. Motor

- 1.1 Se deberá montar el modelo Honda CBR 600 RR, modelos 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 o 2012.
- 1.2 Se prohíbe todo "MECANIZADO" de los piñones de los árboles de levas, así como de los tornillos que los soportan.
- 1.3 Se autoriza eliminar la válvula anti retorno "pair". Para ello, se permite instalar unas tapas metálicas planas en la culata.
- 1.4 El motor de arranque se puede retirar, así como los piñones relacionados con éste, que se encuentran en el motor.
- 1.5 La junta de culata puede ser cambiada.
- 1.6 El filtro de aceite puede ser cambiado.
- 1.7 Todos los carters que contengan aceite y que puedan entrar en contacto con la pista como consecuencia de una caída tendrán que estar protegidos por un segundo carter hecho de un material compuesto como el carbono o el Kevlar®, aluminio, plástico o placas de acero y/o barras también estarán permitidas. Todos estos dispositivos deben estar diseñados para resistir choques repentinos y deben ser atomillados al carter.
- 1.8 Los manguitos de refrigeración y los accesorios pueden ser cambiados para realizar el diseño individual de los radiadores.
- 1.9 En caso de ser necesario, la culata se puede planificar y los asientos de las válvulas reparar, para permitir su reutilización. Este planificado no puede exceder los 0,1 mm. que recomienda el fabricante del motor para este trabajo.
- 1.10 Los únicos pistones permitidos, son los originales. Los pistones de "sobremedida" que ofrece el fabricante, no están permitidos.
- 1.11 Ningún otro cambio que no esté precisado en este artículo, está permitido.
- 1.12 En caso de disputa sobre estas modificaciones, la decisión del Director Técnico, será definitiva.

2. Sistema de admisión de carburante

- 2.1 Los cuerpos de admisión deben ser los originales del fabricante del motor homologado.
- 2.2 No se autoriza la modificación del regulador de presión. Pueden ser eliminados el soporte, la aguja y el flotador de la bomba original de gasolina.



2.3 Las gomas que unen el cuerpo de admisión a la culata, no pueden ser modificadas o cambiadas.

3. El depósito de combustible y manguitos

3.1 El diseño y la construcción del depósito de combustible es libre, siguiendo las directrices de las normas de Grandes Premios, Art. 2.6. No existen restricciones de capacidad.

3.2 El/los tapón(es) de depósito de gasolina debe/n poseer un sistema de apertura y cierre "de rosca".

3.3 Las fijaciones de los conductos de combustible deben mantenerse originales. No obstante se permiten conectores rápidos en dichos conductos.

4. Airbox

4.1 La caja de aire debe mantenerse igual que la originalmente producida por el fabricante de la motocicleta, incluyendo los inyectores secundarios.

4.2 El elemento filtrante puede suprimirse o remplazarse.

4.3 Los tubos de drenaje o de aspiración deben estar cerrados (precintados).

4.4 Todas las motocicletas deben estar provistas de un sistema de reciclado cerrado. La aspiración de aceite debe estar conectada y descargarse en la caja de aire.

4.5 Solo puede ser usado el airbox de la motocicleta homologada. Ninguna modificación, alteración o añadido a esta caja de filtro de aire está permitida, excepto las descritas a continuación.

- Los conductos de aire de entrada al airbox pueden ser cambiados para ajustarse al diseño del chasis.

4.6 Las cámaras de resonancia en la parte superior de la caja de filtro de aire (airbox) pueden ser modificadas, cambiadas o eliminadas, junto a la tapa superior, o bien dejando esta tapa en su lugar. Podrán ser reemplazadas por una placa plana. El volumen de la caja de filtro (airbox) desde el filtro hacia atrás, no podrá incrementarse respecto del original. Consultar el "Diagrama 1" del Apéndice Moto2.

Si se monta una placa plana, el sensor de temperatura de aire original debe ser instalado en la placa en un lugar equivalente a la posición original. Consultar el "Diagrama 2" del Apéndice Moto2.

4.7 Solo aire o la mezcla de aire/combustible está permitida entre el conducto de admisión y la cámara de combustión.

4.8 Los inyectores deben ser unidades del fabricante del motor homologado.

4.9 Los pabellones venturi (trompas de admisión) no pueden modificarse o remplazarse con relación a aquellos montados por el fabricante en la motocicleta homologada.

4.10 Las mariposas de gas no pueden ni cambiarse, ni modificarse.

4.11 No se autoriza el enfriamiento artificial del carburante.

4.12 Está permitido montar un depósito entre la tapa de balancines y el airbox, con la única función de recoger sobrantes del motor. Ninguna otra función está permitida (como la modificación de la presión generada) y únicamente los respiraderos del motor se podrán



REGLAMENTO TÉCNICO Moto2 CEV 2012

Reglamento Técnico

Fabricante del motor la motocicleta: Honda Motor Co., Ltd.
Modelo: CBR600RR07 - CBR600RR08 - CBR600RR09 - CBR600RR10
CBR600RR11 - CBR600RR12

TODO AQUELLO QUE NO ESTÁ AUTORIZADO Y PRECISADO EN ESTE REGLAMENTO **ESTA TOTALMENTE PROHIBIDO**

1. Motor

- 1.1 Se deberá montar el modelo Honda CBR 600 RR, modelos 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 o 2012.
- 1.2 Se prohíbe todo "MECANIZADO" de los piñones de los arboles de levas, así como de los tornillos que los soportan.
- 1.3 Se autoriza eliminar la válvula anti retorno "pair". Para ello, se permite instalar unas tapas metálicas planas en la culata.
- 1.4 El motor de arranque se puede retirar, así como los piñones relacionados con éste, que se encuentran en el motor.
- 1.5 La junta de culata puede ser cambiada.
- 1.6 El filtro de aceite puede ser cambiado.
- 1.7 Todos los carters que contengan aceite y que puedan entrar en contacto con la pista como consecuencia de una caída tendrán que estar protegidos por un segundo carter hecho de un material compuesto como el carbono o el Kevlar®, aluminio, plástico o placas de acero y/o barras también estarán permitidas. Todos estos dispositivos deben estar diseñados para resistir choques repentinos y deben ser atomillados al carter.
- 1.8 Los manguitos de refrigeración y los accesorios pueden ser cambiados para realizar el diseño individual de los radiadores.
- 1.9 En caso de ser necesario, la culata se puede planificar y los asientos de las válvulas reparar, para permitir su reutilización. Este planificado no puede exceder los 0,1 mm. que recomienda el fabricante del motor para este trabajo.
- 1.10 Los únicos pistones permitidos, son los originales. Los pistones de "sobremedida" que ofrece el fabricante, no están permitidos.
- 1.11 Ningún otro cambio que no esté precisado en este artículo, está permitido.
- 1.12 En caso de disputa sobre estas modificaciones, la decisión del Director Técnico, será definitiva.

2. Sistema de admisión de carburante

- 2.1 Los cuerpos de admisión deben ser los originales del fabricante del motor homologado.
- 2.2 No se autoriza la modificación del regulador de presión. Pueden ser eliminados el soporte, la aguja y el flotador de la bomba original de gasolina.



9.2 No están permitidos los sistemas de control de tracción.

10. Toma de datos

10.1 Los sistemas de toma de datos son libres

11. Diseño de Chasis, Construcción y carenado

11.1 El chasis será un prototipo, diseñado y construido siguiendo las normas técnicas del FIM Grand Prix. El chasis, basculante, depósito de combustible, asiento y carenado/colín, no pueden provenir de una motocicleta de producción, deben ser prototipos.

11.2 El carenado inferior debe estar fabricado para contener, en caso de incidente en el motor, al menos la mitad de la totalidad del aceite y del líquido de refrigeración del motor (mínimo 5 litros). La parte inferior de las aberturas en el carenado debe estar situada al menos a 50mm por encima de la parte interior del carenado.

11.3 El carenado inferior deberá incluir un agujero de 25mm, situado en la parte delantera del mismo. Este agujero debe permanecer cerrado mediante un tapón en caso de pista seca y deben abrirse únicamente en caso de lluvia.

12. Peso

12.1 Peso mínimo **140 Kg**

13. Frenos

13.1 Deben estar realizados en aleación de acero. Queda totalmente prohibida la utilización de discos de freno de carbono y compuesto cerámicos.

14. Suspensión

14.1 Están prohibidos aquellos sistemas de suspensión activos o semi-activos y/o controles electrónicos de cualquier aspecto de la suspensión, incluyendo aquellos que controlen la altura del piloto. Los ajustes para la suspensión y los sistemas de los amortiguadores de dirección sólo pueden ser realizados de manera manual y mediante ajustes mecánicos/hidráulicos.

15. Llantas

15.1 Solo se permiten las siguientes medidas en las llantas: Delantera, 3.75" x 17"
Trasera, 6.00" x 17"

15.2 No están permitidas las llantas construidas con materiales compuestos (incluido la fibra de carbono reforzada, fibra de cristal reforzada y similar)

16. Neumáticos

16.1 Sólo los neumáticos procedentes del Suministrador Oficial se pueden usar en CEV Moto2 y para ellos cada equipo deberá firmar un contrato con este último.

16.2 Las especificaciones de los neumáticos disponibles en cada evento serán determinadas por el suministrador.

17. Materiales y Construcción

17.1 Los materiales de construcción deben cumplir con el Art. 2.7.10 Reglamento Técnico del FIM Campeonato del Mundo de Velocidad.

18. General

Numero de motocicletas

18.1 El equipo puede verificar una sola motocicleta por piloto.

19. Otras normas

19.1 Aparte de las normas mencionadas, todos los otros criterios de construcción, dimensiones y especificaciones son como la Normas FIM de Grandes Premios.



20. Números y Fondos

20.1 El número delantero debe estar colocado en el centro del frontal del carenado o en el lado donde esté situado el cronometraje oficial.

20.2 Los números traseros o laterales, no serán obligatorios. De colocarse, deberán regir las mismas normas que para el delantero.

20.3 Las medidas de los números serán: 140mm x 25mm mínimo. Los números del 1 al 9 podrán ser más anchos. Sólo se podrán utilizar los dorsales del 1 al 99.

20.4 El fondo debe ser una única área, que proporcione un espacio alrededor del número de al menos 25 mm.

20.5 En caso de disputa sobre la legibilidad de el/los número/s, la decisión del Director Técnico será definitiva.

20.6 Los números y fondos serán:

	Fondo	Número
Moto2	Amarillo	Negro

Diagrama 1

